中国光学（中英文） Chinese Optics 核心期刊

基于摄影测量的定日镜面形误差检测方法研究

魏秀东 张凡 许英朝

The measurement method of heliostat surface shape error based on photogrammetry

WEI Xiu-dong, ZHANG Fan, XU Ying-chao

引用本文:
魏秀东, 张凡, 许英朝. 基于摄影测量的定日镜面形误差检测方法研究[J]. 中国光学, 2023, 16(2): 425-433. doi: 10.37188/CO.2021-0210
WEI Xiu-dong, ZHANG Fan, XU Ying-chao. The measurement method of heliostat surface shape error based on photogrammetry[J]. *Chinese Optics*, 2023, 16(2): 425-433. doi: 10.37188/CO.2021-0210

在线阅读 View online: https://doi.org/10.37188/CO.2021-0210

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

采用五棱镜扫描法检测大口径平面镜的面形
Surface shape measurement of large flat mirrors using a scanning pentaprism method
中国光学. 2019, 12(4): 920 https://doi.org/10.3788/CO.20191204.0920

一种针对超大口径凸非球面的面形检测方法
Surface testing method for ultra-large convex aspheric surfaces
中国光学. 2019, 12(5): 1147 https://doi.org/10.3788/CO.20191205.1147

经纬仪主镜在支撑系统下的面形变化
Surface deformation of theodolite primary mirror under the support system
中国光学. 2017, 10(4): 477 https://doi.org/10.3788/CO.20171004.0477

长条形镜面面形拟合技术研究
Surface fitting technology of rectangular mirror
中国光学. 2018, 11(6): 1011 https://doi.org/10.3788/CO.20181106.1011

仿生复眼系统的子眼安装孔对准误差检测方法
Alignment error detection method of sub-eye mounting hole for bionic compound eye system
中国光学. 2019, 12(4): 880 https://doi.org/10.3788/CO.20191204.0880

基于散斑干涉的光滑表面变形快速检测
Fast detection of smooth surface deformation based on DSPI
中国光学. 2018, 11(2): 248 https://doi.org/10.3788/CO.20181102.0248

文章编号　2097-1842(2023)02-0425-09

基于摄影测量的定日镜面形误差检测方法研究

魏秀东[1*], 张　凡[1], 许英朝[2]
（1. 长春理工大学 空间光电技术研究所，吉林 长春 130022；
2. 厦门理工学院 光电与通信工程学院，福建 厦门 361024）

摘要: 在塔式太阳能热发电中，定日镜面形误差对镜场光学效率具有重要影响，因此需要对定日镜面形误差进行检测。定日镜一般由多个子镜拼接而成，子镜的倾斜角度误差是定日镜面形误差的重要组成部分。本文提出一种基于摄影测量的定日镜子镜倾斜角度误差的检测方法，即在已知定日镜子镜外形尺寸的条件下，利用摄影成像原理计算出定日镜子镜 4 个角点的空间位置坐标，进而求出子镜的法线方向，再利用所求得的法线计算出子镜的倾斜角度，最终实现对定日镜子镜倾斜角度误差的检测。本文详细阐述了该方法的测量原理，推导了计算公式，并利用平面镜与相机进行了相关验证实验。通过在不同距离下对不同倾斜角度的平面镜进行测量实验，得出测量镜面倾斜角度与实际倾斜角度的偏差约为 0.1°~0.3°，实验结果表明：该方法能够较准确地检测定日镜子镜的倾斜角度误差，验证了该方法的正确性和可行性。

关　键　词: 定日镜；子镜；摄影测量；法线方向；倾斜角度；面形检测
中图分类号: TP751.1;TK519　　**文献标志码:** A　　**doi:** 10.37188/CO.2021-0210

The measurement method of heliostat surface shape error based on photogrammetry

WEI Xiu-dong[1*], ZHANG Fan[1], XU Ying-chao[2]
(1. *Institute of Space Optoelectronics Technology*, *Changchun University of Science and Technology*, *Changchun* 130022, *China*;
2. *School of Optoelectronics and Communication Engineering*, *Xiamen University of Technology*, *Xiamen* 361024, *China*)
∗ *Corresponding author*, *E-mail*: *weixiudong*211@163.*com*

Abstract: In the tower solar thermal power plant, the heliostat mirror shape errors have an important impact on the optical efficiency of the heliostat field, so it is necessary to measure the heliostat surface shape error. The heliostat is generally made up of splicing multiple sub-mirrors, the tilt angle error of the sub-mirror is an important part of the heliostat mirror shape errors. This paper proposes a measurement method for the tilt angle errors of the heliostat sub-mirror based on the photogrammetry. That is, under the condition of known the shape size of the heliostat sub-mirror, the spatial position coordinates of the 4 corner points of the helio-

收稿日期: 2021-12-06; **修订日期:** 2022-01-04
基金项目: 福建省自然科学基金面上项目(No. 2019J01876)
Supported by Fujian Natural Science Foundation of Fujian Province (No. 2019J01876)

stat sub-mirror are calculated by using the principle of photographic imaging. Then the normal direction of the sub-mirror is found, and the tilt angle of the sub-mirror is calculated by using the normal line obtained. Finally, the measurement for the tilt angle error of the heliostat sub-mirror is achieved. In this paper, the measurement principle of the method is elaborated, the calculation formula is derived, and relevant verification experiments were carried out using planar mirrors and cameras. By measuring the plane mirror with different tilt angles at different distances, the deviation between the measured tilt angle and the actual tilt angle of the plane mirror is about 0.1°~0.3°, and the experimental results show that the method can accurately measure the tilt angle error of the sub-mirror of heliostat, thus the correctness and feasibility of the method are verified.

Key words: heliostat; sub-mirror; photogrammetry; normal direction; tilt angle; surface shape detection

1 引 言

太阳能热发电是新能源利用的重要方式，近年来获得了快速发展[1]。太阳能热发电系统[2-3]主要由聚光镜场、吸/换热装置、储热装置和发电装置组成。塔式太阳能热发电系统[4-5]作为太阳能热发电的一种，其利用定日镜场将太阳光聚焦到中心塔顶部的吸热器上，加热吸热器里面的传热介质并产生高温蒸汽，驱动汽轮机做功，带动发电机发电。

定日镜作为塔式太阳能热发电系统的主要组成部分之一，在塔式太阳能热发电中起到汇聚太阳光的关键性作用。定日镜的面形误差会影响镜场的光学效率，因此对定日镜面形检测的研究十分重要。定日镜面形检测的方法[6-7]主要有 3 种：激光扫描法、条纹反射法、摄影测量法。激光扫描法[8-9]是基于激光光线追迹的方法，利用激光光束入射到被测镜，经过反射后打在目标屏上，再利用相机拍摄目标屏图像，通过图像处理确定入射光线与反射光束的方向，从而得出被测点的法线方向；条纹反射法[10-13]是利用投影仪在光屏上投射黑白相间的条纹，光屏上的条纹经被测镜反射后被相机接收，由于反射的条纹会被镜面面形调制，通过相应的算法处理，能够测量出被测镜的面形误差；摄影测量法[14-15]是在被测镜表面安装标志点，然后通过多部相机从不同角度对被测镜进行拍摄，利用共线性原理，通过图像处理可以得到每个标志点的空间三维坐标，从而对被测镜进行面形重建，最终得到被测镜的面形误差。2010 年，Röger 等用基于边缘检测的摄影测量法检测定日镜整体面形的拼接误差[16]。该方法的优点是不用安装标志点即可检测。由于摄影测量法对被测物体没有任何限制，所以它几乎可以用来测量任意类型的太阳能聚光镜[6]。

定日镜的面形误差包括镜面光学面形误差和子镜间的拼接误差。子镜拼接误差包括空间位置误差和倾斜角度误差，其中倾斜角度误差对聚光影响最大。本文基于摄影测量原理，提出一种定日镜子镜倾斜角度的检测方法。使用相机对定日镜进行拍照，将拍得的照片导入 Matlab 程序中，利用 Matlab 程序提取定日镜子镜 4 个角点的像素坐标，然后用 Matlab 程序求解出物方定日镜子镜 4 个角点相对相机投射中心的距离，从而得出子镜角点相对相机投射中心的空间位置坐标，进而求出子镜平面的法向量，并计算出子镜的倾斜角度，最终达到检测定日镜子镜倾斜角度误差的目的。

2 测量原理及公式推导

2.1 测量原理分析

基于摄影测量的定日镜面形检测方法的基本原理示意图如图 1 所示。利用相机对定日镜进行拍照，提取像方定日镜子镜 4 个角点的像素坐标，根据相机像元尺寸大小，可以计算出像方子镜 4 条边在像面上的长度。由于相机镜头焦距 f 固定，故可以求出像方定日镜子镜 4 个角点与相机投射中心的距离，并由此计算出像方定日镜子镜 4 条边相对相机投射中心的张角的余弦值。根据

小孔成像原理, 物方定日镜子镜 4 条边相对相机投射中心的张角与像方定日镜子镜 4 条边相对相机投射中心的张角相等, 因此, 在物方定日镜子镜 4 条边的尺寸已知的条件下, 可以建立 4 个关于物方定日镜子镜 4 条边和 4 个角点与相机投射中心的距离的余弦公式, 通过 4 个二元二次方程可以求出物方子镜 4 个角点与相机投射中心的距离解。由于通过方程求得的距离有多个解, 可以根据相机投射中心与物方定日镜子镜的距离l, 确定 4 个角点的距离解的限定范围, 从而筛选出 4 个角点与相机投射中心的距离最优解, 进而可以确定物方子镜 4 个角点的空间位置坐标, 最终求得子镜平面的法线方向, 并依据所求法向量计算出子镜平面的倾斜角度, 从而达到定日镜面形检测的目的。

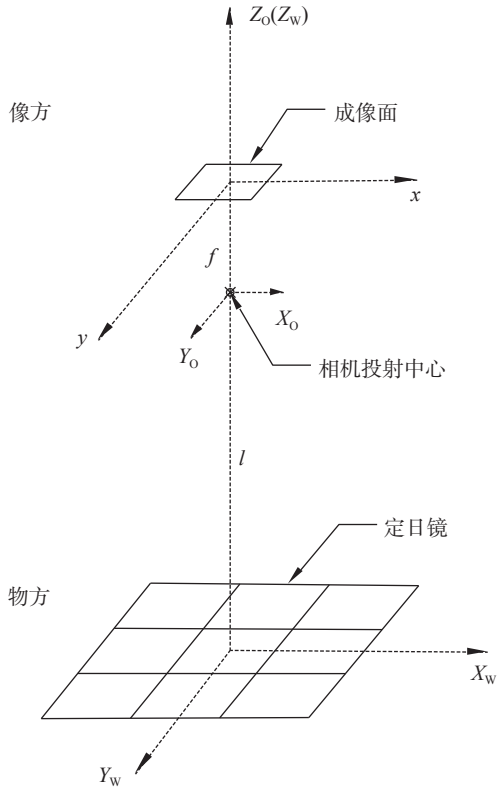

图 1　测量原理示意图

Fig. 1　Schematic diagram of the measurement principle

2.2　理论公式推导

如图 2 所示, A、B、C、D为物方定日镜子镜的 4 个角点, 经过相机的投射中心O在像面上成像为A'、B'、C'、D', O'为像面中心, 理想情况下相机投射中心与像面中心垂直, 距离为镜头焦距f, 即OO'为相机镜头中心到成像面的距离(即焦距)为f。通过图像处理可以得到A'、B'、C'、D'、O'的像素坐标, 设O'在像面上的像素坐标为(X_0, Y_0), A'、B'、C'、D' 4 点的像素坐标分别为(X_1, Y_1)、(X_2, Y_2)、(X_3, Y_3)、(X_4, Y_4)。

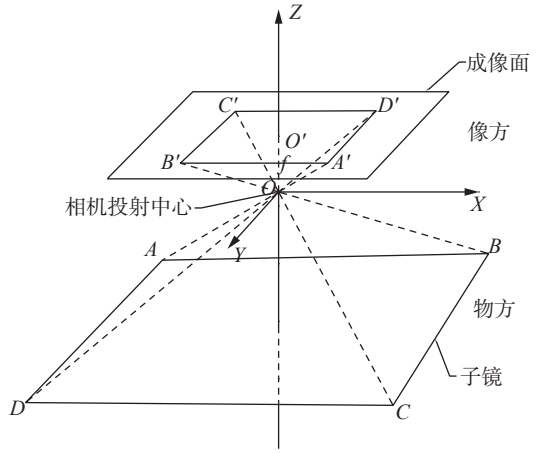

图 2　子镜平面成像示意图

Fig. 2　Schematic diagram of submirror plane imaging

根据相机的技术参数, 可以知道像元的尺寸, 换算成像素比例为d_X和d_Y, 从而可以通过像素距离求出像方$A'O'$的物理长度

$$A'O' = \sqrt{[d_X \cdot (X_1 - X_0)]^2 + [d_Y \cdot (Y_1 - Y_0)]^2} \quad . \tag{1}$$

又因为$\Delta A'O'O$为直角三角形, 从而可以求出像方$A'O$的物理长度

$$A'O = \sqrt{f^2 + A'O'^2} \quad . \tag{2}$$

同理可得像方$B'O$、$C'O$、$D'O$的物理长度。

在$\Delta A'OB'$ 中, 已知三边的长度, 可以求出$\angle A'OB'$的余弦值:

$$\cos\angle A'OB' = \frac{A'O^2 + B'O^2 - A'B'^2}{2A'O \times B'O} \quad . \tag{3}$$

同理可得$\angle B'OC'$、$\angle C'OD'$、$\angle D'\boldsymbol{O}\boldsymbol{A}'$的余弦值。

由于$A'B'$是AB成的像, $\angle A'OB' = \angle AOB$, 即余弦值相等, 因为物方定日镜子镜的尺寸已知, 即AB已知, 故可得方程

$$\cos\angle AOB = \frac{AO^2 + BO^2 - AB^2}{2AO \times BO} = \cos\angle A'OB' \quad , \tag{4}$$

可转换为

$$AO^2 + BO^2 - AB^2 - 2AO \times BO \times \cos\angle A'OB' = 0 \quad . \tag{5}$$

同理可得

$$BO^2+CO^2-BC^2-2BO\times CO\times\cos\angle B'OC'=0 \quad (6)$$

$$CO^2+DO^2-CD^2-2CO\times DO\times\cos\angle C'OD'=0 \quad (7)$$

$$AO^2+DO^2-AD^2-2AO\times DO\times\cos\angle D'\boldsymbol{O}A'=0 \quad (8)$$

将物方AO、BO、CO、DO设为未知数，由此可得 4 个二元二次方程，联立方程 (5)~(8)，通过 Matlab 程序求解，可以算出AO、BO、CO、DO的距离。从而通过AO、BO、CO、DO的距离算出物方A、B、C、D 4 点相对相机投射中心O点的坐标。

由上述可知，A'相对O点的坐标可以写为$A'(d_X\cdot(X_1-X_0),d_Y\cdot(Y_1-Y_0),f)$，$A'O$的距离已知，可以求出$\boldsymbol{OA'}$方向的单位向量，记为$\boldsymbol{a}_0$，则

$$\boldsymbol{a}_0=\frac{\boldsymbol{OA'}}{|\boldsymbol{OA'}|} \quad (9)$$

由于$\boldsymbol{OA'}$和$\boldsymbol{OA}$反向，所以得到A点坐标应为$AO(-\boldsymbol{a}_0)$，同理可得B、C、D的坐标。在ΔABC中，通过$\boldsymbol{BA}\times\boldsymbol{BC}$可求得$\Delta ABC$的法向量$\boldsymbol{N}_1$，在$\Delta ADC$中，通过$\boldsymbol{DA}\times\boldsymbol{DC}$可求得$\Delta ADC$的法向量$\boldsymbol{N}_2$。

定日镜子镜的 4 个角点在理想情况下近似位于同一个平面，但由于计算求得的距离存在误差，子镜角点的空间位置坐标不在一个严格的平面上，为了减小法线方向求得的误差，将ΔABC和ΔADC的法向量相加取平均作为子镜平面的法向量：

$$\boldsymbol{N}=\frac{\boldsymbol{N}_1+\boldsymbol{N}_2}{2} \quad (10)$$

从上述分析知道，根据定日镜子镜的图像，可以计算出任一子镜所在平面的法向量，根据图 2 中的相机拍摄方向，设给定的法向量为$\boldsymbol{N}_0$=[0 0 1]，任一子镜 M 的法向量为$\boldsymbol{N}_{\mathrm{M}}$，两法向量的夹角为 θ，则

$$\cos\theta=\frac{\boldsymbol{N}_0\cdot\boldsymbol{N}_{\mathrm{M}}}{|\boldsymbol{N}_0|\cdot|\boldsymbol{N}_{\mathrm{M}}|} \quad (11)$$

从而可以求出 θ 的值，此 θ 值即为定日镜子镜与水平面的夹角。

3 实验验证

3.1 实验装置

为了验证该测量方法的正确性和可行性，利用可见光相机和两面边长为 250 mm 的平面镜进行定日镜子镜倾斜角度测量实验，实验装置示意图如图 3 所示。在光学平台上固定一个云台，将边长为 250 mm 的平面镜固定在云台上，通过云台可以调整平面镜的倾斜角度，在光学平台右侧，用三角架固定一个相机对平面镜进行拍照。本次实验选择德国 AVT 公司的 Manta G-504B 工业数字摄像机作为测量相机，该相机分辨率为 2 452 pixel×2 056 pixel，相机像元尺寸为 3.45 μm，镜头焦距为 8.5 mm。实验选择在光学平台右侧的同等高度处固定相机，并调整相机拍摄角度，使其正对着平面镜进行拍摄。为了方便测量且提高实验的准确性，移动云台使平面镜边缘与光学平台边缘平齐，然后固定云台位置。通过角度测量仪测出平面镜的实际倾斜角度，通过卷尺测出相机投射中心与光学平台边缘的距离。

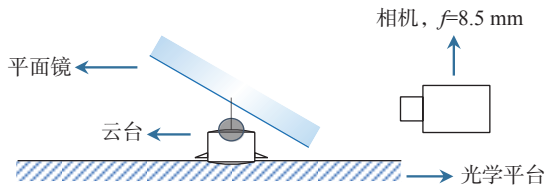

图 3 实验装置示意图

Fig. 3 Schematic diagram of the experimental apparatus

3.2 实验过程与结果

(1) 实验 1。调整云台，使平面镜与水平面成一定角度，用角度测量仪测出其倾斜角度，记录倾斜角度测量值。在水平距离平面镜 1.3 m、高度相等处固定相机，正对平面镜进行拍照，并保存图像。每次拍摄完成后，调整云台，改变平面镜与水平面的夹角，并用角度测量仪测出其倾斜角度，记录倾斜角度测量值，重新进行拍照，并保存图像。图 4 为实验 1 中某次拍摄所得的测试图像。

将拍摄的图像导入 Matlab 程序，利用 Matlab 程序提取出平面镜 4 个角点的像素坐标，根据上述推导的计算公式编写出相应的算法程序，通过 Matlab 程序求解出物方平面镜 4 个角点与

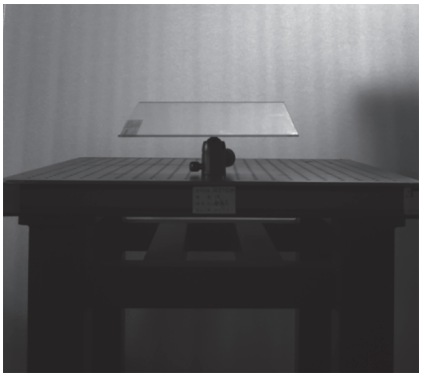

图 4　1.3 m 处相机采集的平面镜照片

Fig. 4　Flat mirror photos taken by the camera at 1.3 m

相机投射中心的距离值。由于方程组为 4 个二元二次方程, 可以算出每个距离值有 16 个解, 根据相机与平面镜的拍摄距离, 确定距离解的取值范围, 筛选出距离值的最优解, 然后计算出物方平面镜 4 个角点的空间位置坐标, 最终计算出平面镜的倾斜角度。表 1 为实验 1 中相机在距离平面镜 1.3 m 处, 对不同倾斜角度的平面镜拍照测量的结果, 图 5 为实验 1 中测量的镜面倾斜角度误差的绝对值随镜面实际倾斜角度变化的柱状图。

表 1　1.3 m 处倾斜角度的检测结果

Tab. 1　Detection result of tilt angle at 1.3 m

实验组别	实际倾角/(°)	测量倾角/(°)	误差/(°)
1	10.28	10.332	+0.052
2	11.61	11.679	+0.069
3	13.76	13.747	−0.027
4	15.41	15.630	+0.220
5	16.86	16.985	+0.125
6	18.43	18.550	+0.070
7	19.48	19.667	+0.187
8	20.51	20.614	+0.104
9	21.17	21.230	+0.060
10	22.01	22.249	+0.139
11	24.25	24.505	+0.255

由于测量过程中需要手动提取平面镜角点像素坐标, 因此表 1 中“测量倾角”一栏为对平面镜图片进行反复提取角点坐标后计算的平均角度。根据测量结果可得基于拍照测量得到的平面镜倾

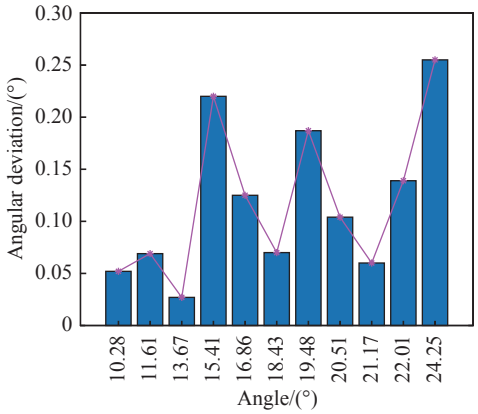

图 5　1.3 m 处角度误差随所测角度变化的柱状图

Fig. 5　Histogram of angular deviation varying with the measured angle at 1.3 m

斜角度的测量误差均方根大小为 0.138°。

为了直观反映测量结果, 利用 Matlab 程序画出物方平面镜 4 个角点在空间坐标系下的位置图, 该坐标系以相机投射中心为原点, 相机光轴为 Z 轴, 得到的图像如图 6 所示, 其中坐标轴的单位为 mm。

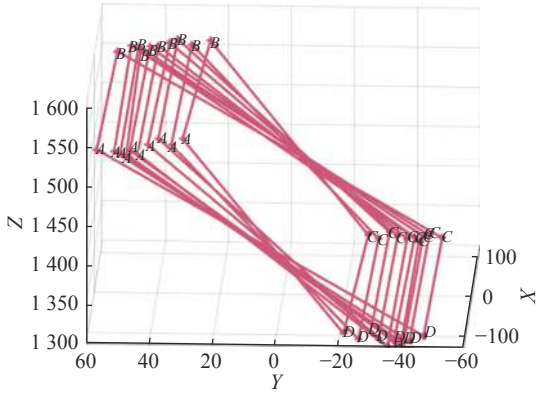

图 6　Matlab 程序模拟的平面镜 4 个角点的空间位置图

Fig. 6　Spatial position map of 4 corner points of a planar mirror simulated by Matlab program

结合表 1 和图 6 可以看出, Matlab 程序能较清楚地模拟还原出平面镜的位置, 并且计算出的倾斜角度与实际倾斜角度非常接近, 由此可见本文基于摄影测量的子镜倾斜角度检测方法的正确性与可行性。

(2) 实验 2。为了进一步研究大倾斜角度下的子镜检测, 进行了第二次实验。将被测镜面安装在三脚架上, 三脚架放在光学平台上, 在水平距离平面镜 1.6 m 处对平面镜进行拍照。调整平面镜角度和相机高度, 用同一相机正对平面镜进行

拍照，实验步骤与实验 1 相同，图 7 为实验 2 中拍摄的平面镜图像。

图 7　1.6 m 处相机采集的平面镜照片

Fig. 7　Flat mirror photos taken by the camera at 1.6 m

表 2 为实验 2 中相机在水平距离平面镜 1.6 m 处，对不同倾斜角度的平面镜进行拍照测量的结果，图 8 为实验 2 中测量的平面镜倾斜角度误差的绝对值随镜面实际倾斜角度变化的柱状图。

表 2　1.6 m 处倾斜角度的检测结果

Tab. 2　Detection results of tilt angle at 1.6 m

实验组别	实际倾角/(°)	测量倾角/(°)	误差/(°)
1	82.21	81.936	−0.274
2	78.31	78.419	+0.109
3	71.50	71.647	+0.147
4	64.98	64.533	−0.447
5	59.97	59.808	−0.162
6	56.89	56.574	−0.316
7	50.66	50.502	−0.158
8	45.21	44.845	−0.365
9	41.84	41.743	−0.097
10	34.72	35.617	+0.103

根据测量结果可得基于拍照测量得到的平面镜倾斜角度的测量误差均方根大小为 0.235°。利用 Matlab 程序模拟还原的物方平面镜空间位置图如图 9 所示。

通过以上实验分析可得，利用该方法可以测量平面镜的倾斜角度，且对所测倾斜角度的大小没有限制。同时在不同距离下，利用该方法都可

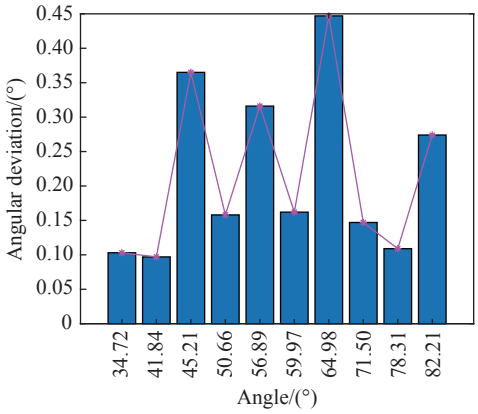

图 8　1.6 m 处角度误差随所测角度变化的柱状图

Fig. 8　Histogram of angular deviation varying with the measured angle at 1.6 m

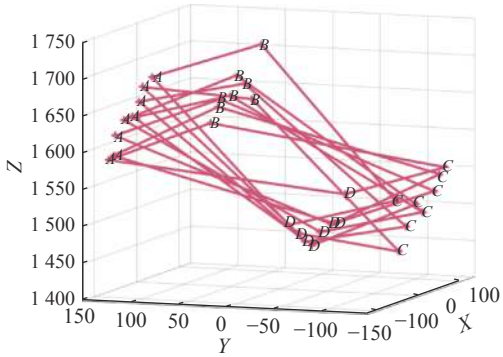

图 9　Matlab 程序模拟的平面镜 4 个角点的空间位置图

Fig. 9　Spatial position map of 4 corner points of a planar mirror simulated by Matlab program

以对平面镜倾斜角度进行测量。

(3) 实验 3。为了研究拍摄距离对平面镜倾斜角度测量误差的影响，进行第 3 次实验。调整云台，使得平面镜与水平面成一定夹角，在不同拍摄距离下用相机对平面镜的倾斜角度进行测量。本次实验中用相机在不同拍摄距离下分别对倾斜角度为 16.81°和 10.28°的平面镜进行测量，测量结果如表 3 所示。

根据测量结果绘制测量得到的平面镜倾斜角度误差的绝对值随拍摄距离变化的柱状图如图 10 所示。

结合表 3 和图 10 可以看出，在实验 3 中，相机在拍摄距离为 1.0~1.4 m 之间拍摄时，测量的误差较小，误差在 0.1°以内；在其他拍摄距离下，测得的角度误差稍大，但仍在 0.25°以内。由此可见，在适宜的拍摄距离内，该方法均可对平面镜倾斜角度进行测量。

表 3　不同距离下对倾角为 16.81°和 10.28°平面镜的测量结果

Tab. 3　Measurement results for the mirror with the tilt angles of 16.81° and 10.28° at different distances

实验组别	距离/m	检测倾角(°)		误差(°)		平均误差/(°)
		10.28°	16.81°	10.28°	16.81°	
1	0.8	10.478	16.985	+0.198	+0.175	+0.186
2	1.0	10.345	16.819	+0.065	+0.009	+0.037
3	1.2	10.359	16.654	+0.079	−0.156	−0.038
4	1.4	10.278	16.639	−0.002	−0.171	−0.086
5	1.6	10.342	16.481	+0.062	−0.329	−0.134
6	1.8	10.250	16.586	−0.030	−0.224	−0.127
7	2.0	10.213	16.657	−0.067	−0.153	−0.110
8	2.2	10.241	16.523	−0.039	−0.287	−0.163
9	2.4	10.189	16.481	−0.091	−0.329	−0.210

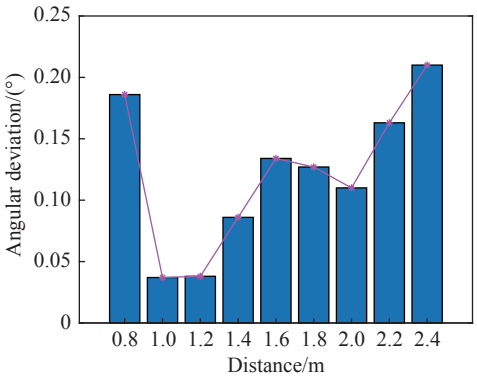

图 10　角度误差随距离变化的柱状图

Fig. 10　A histogram of angular deviation varying with distance

3.3　测量误差分析

目前, 像方平面镜 4 个角点的像素坐标是通过手动提取得到的, 每次提取的坐标会有几个像素的误差, 造成了测量误差。通过对同一张平面镜图像的 4 个角点反复提取像素坐标, 并取平均值, 可以减小误差, 得到的倾斜角度平均测量误差约为 0.1°。在以后的工作中, 可以通过改进边缘角点提取算法, 利用图像处理得到平面镜 4 个角点的像素坐标, 提高角点坐标提取精度, 从而减小因角点坐标提取误差造成的测量误差。

另外, 造成测量误差的原因还包括:

(1) 图像不够清晰锐利, 图像上子镜的角点不容易分辨, 提取子镜角点坐标时有较大误差, 最终导致计算结果有误差;

(2) 采集到的图像存在畸变, 导致计算结果有误差;

(3) 由于相机安装工艺问题, 相机投射中心与图像传感器中心不在一条光轴上, 导致计算结果有误差。

其中, 误差 (3) 是本文测量方法的系统误差, 在测量实验中基本不变, 可以通过对相机参数的标定进行消除。对于误差 (1), 可以通过采用高分辨率相机、提高图像对比度等方法, 提高子镜角点的提取精度; 对于误差 (2), 可以利用 Matlab 程序对相机的内参数进行标定, 并结合相应的算法研究, 消除图像畸变对测量结果的影响。

4　结　论

本文针对定日镜面形误差检测中的子镜倾斜角度误差检测问题, 提出了一种基于摄影测量的定日镜子镜倾斜角度误差检测方法, 详细阐述了该方法的测量原理, 并进行了理论公式的推导。通过对不同倾斜角度的平面镜的测量实验, 和在不同距离下的测量实验, 得出测得的平面镜倾斜角度与实际倾斜角度的偏差约为 0.1°~0.3°。实验结果表明该方法能够检测不同倾斜角度和不同测量距离下的子镜的倾斜角度误差, 验证了该方法的正确性和可行性。该检测方法基于摄影测量原理, 能够方便快捷地进行定日镜子镜倾斜角度误差的外场检测, 对提高定日镜及镜场光学效率具有重要意义。

参考文献:

[1] 王志峰, 何雅玲, 康重庆, 等. 明确太阳能热发电战略定位促进技术发展[J]. 华电技术, 2021, 43(11): 1-4.
WANG ZH F, HE Y L, KANG CH Q, *et al*.. Strategic positioning of solar thermal power generation to promote technological progress[J]. *Huadian Technology*, 2021, 43(11): 1-4. (in Chinese)

[2] MILLS D, MORGAN R. Solar thermal power as the plausible basis of grid supply[M]//GOSWAMI D Y, ZHAO H M. Proceedings of ISES World Congress 2007. Berlin: Springer, 2007: 191-197.

[3] 韩雪冰, 魏秀东, 卢振武, 等. 太阳能热发电聚光系统的研究进展[J]. 中国光学, 2011, 4(3): 233-239.
HAN X B, WEI X D, LU ZH W, *et al*.. Review of concentration system in solar thermal power plant[J]. *Chinese Optics*, 2011, 4(3): 233-239. (in Chinese)

[4] BUCK R, BARTH C, ECK M, *et al*.. Dual-receiver concept for solar towers[J]. *Solar Energy*, 2006, 80(10): 1249-1254.

[5] MILLS D. Advances in solar thermal electricity technology[J]. *Solar Energy*, 2004, 76(1-3): 19-31.

[6] 肖君. 太阳能热发电曲面反光镜面形检测技术研究[D]. 长春: 中国科学院研究生院(长春光学精密机械与物理研究所), 2015.
XIAO J. *Study of surface shape measurement of the solar concentrator mirrors in solar thermal power applications*[D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2015. (in Chinese)

[7] 张磊, 刘东, 师途, 等. 光学自由曲面面形检测技术[J]. 中国光学, 2017, 10(3): 283-299.
ZHANG L, LIU D, SHI T, *et al*.. Optical free-form surfaces testing technologies[J]. *Chinese Optics*, 2017, 10(3): 283-299. (in Chinese)

[8] JONES S A, GRUETZNER J K, HOUSER R M, *et al*. . VSHOT measurement uncertainty and experimental sensitivity study[C]//*Proceedings of the Thirty-Second Intersociety Energy Conversion Engineering Conference*, IEEE, 1997: 1877-1882.

[9] 宗文鹏, 李广云, 李明磊, 等. 激光扫描匹配方法研究综述[J]. 中国光学, 2018, 11(6): 914-930.
ZONG W P, LI G Y, LI M L, *et al*.. A survey of laser scan matching methods[J]. *Chinese Optics*, 2018, 11(6): 914-930. (in Chinese)

[10] BOTHE T, LI W S, VON KOPYLOW C, *et al*. . Fringe reflection for high resolution topometry and surface description on variable lateral scale[M]//OSTEN W. Fringe 2005. Berlin: Springer, 2005: 362-371.

[11] 王涛. 塔式太阳能聚热发电定日镜面形检测方法研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2015, doi: 10.7666/d.D01279196.
WANG T. The research of heliostat mirror shape detection method about tower solar power generation[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2015, doi: 10.7666/d.D01279196. (in Chinese)

[12] 邵山川. 基于条纹反射法的金刚石车床在位反射镜面形检测技术研究[D]. 长春: 中国科学院大学(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所), 2018: 1-111.
SHAO SH CH. Study on in-suit surface shape measurement technology with fringe reflection for single point diamond turning mirrors[D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2018: 1-111. (in Chinese)

[13] 冀翼, 张学军, 袁婷, 等. 用于智能移动设备的条纹反射法检测系统[J]. 中国光学, 2017, 10(2): 267-279.
JI Y, ZHANG X J, YUAN T, *et al*.. Deflectometry measurement system for smart mobile devices[J]. *Chinese Optics*, 2017, 10(2): 267-279. (in Chinese)

[14] SHORTIS M R, JOHNSTON G H G, POTTLER K, *et al*. . Photogrammetric analysis of solar collectors[C]//*The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, ISPRS, 2008: 81-88.

[15] 王君, 董明利, 李巍, 等. 大型槽式太阳能反射镜面摄影测量方法[J]. 激光与光电子学进展, 2018, 55(5): 240-246.
WANG J, DONG M L, LI W, *et al*.. Photogrammetric method for large trough solar reflector[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2018, 55(5): 240-246. (in Chinese)

[16] RÖGER M, PRAHL C, ULMER S. Heliostat shape and orientation by edge detection[J]. *Journal of Solar Energy Engineering*, 2010, 132(2): 021002.

作者简介:

魏秀东(1979—), 男, 河北河间人, 博士, 副研究员, 硕士生导师, 2004 年 7 月于吉林大学通信工程学院光信息科学与技术专业获得工学学士学位; 2009 年于中国科学院长春光学精密机械与物理研究所获得光学博士学位。主要从事太阳能光热发电聚光系统设计及光学性能检测技术的研究。
E-mail: weixiudong211@163.com

张　凡(1997—), 男, 湖北黄冈人, 硕士研究生, 2020 年于河北大学物理科学与技术学院光电信息科学与工程专业获得理学学士学位。主要从事图像处理与光学检测等方面的研究。
E-mail: 1964073326@qq.com

《中国光学》征稿启事

《中国光学》为双月刊, A4 开本; 刊号: ISSN 2095-1531/CN 22-1400/O4; 国内外公开发行, 邮发代号: 国内 12-140, 国外 BM6782。

- ★ 荷兰 Scopus 数据库
- ★ 美国《乌利希国际期刊指南》
- ★ 美国《化学文献》
- ★ 波兰《哥白尼索引》
- ★ 俄罗斯《文摘杂志》
- ★ 美国工程索引(Ei)数据库
- ★ 美国 ESCI 数据库
- ★ 中国精品科技期刊
- ★ 中国科技核心期刊
- ★ 中国光学学会会刊
- ★ 中国科技论文与引文数据库
- ★ 中国期刊全文数据库
- ★ 万方数字化期刊全文数据库
- ★ 中国科技期刊数据库
- ★ 中国光学期刊网数据库

主要栏目: 微纳光学、信息光学、集成光电子、光谱学和光谱仪器、激光技术与应用、光学功能材料、光学设计与工艺、大气与空间光学、光学仪器与测试、综述、前沿动态、产业资讯、科普教学、实验室介绍、自然科学基金项目进展、前沿热点访谈、热点论文等。

发稿类型: 学术价值显著、实验数据完整的原创性论文; 研究前景广阔, 具有实用、推广价值的技术报告; 有创新意识, 能够反映当前先进水平的阶段性研究简报; 对当前学科领域的研究热点和前沿问题的专题报告; 以及综合评述国内外光学技术研究现状、发展动态和未来发展趋势的综述性论文。

欢迎投稿、荐稿。

主管单位: 中国科学院
主办单位: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所
协办单位: 激光与物质相互作用国家重点实验室
编辑出版: 《中国光学》编辑部
投稿网址: http://chineseoptics.net.cn
邮件地址: chineseoptics@ciomp.ac.cn; zggxcn@126.com
联系电话: 0431-86176852; 0431-84627061　　传　真: 0431-84627061
编辑部地址: 长春市东南湖大路 3888 号(130033)