

基于圆形标志点的深空探测全景相机标定方法

吴凡路^{1,2} 刘建军^{1,3} 任鑫^{1,3} 李春来^{1,3}

(¹ 中国科学院国家天文台, 北京 100012; ² 中国科学院大学, 北京 100049)
³ 中国科学院月球与深空探测重点实验室, 北京 100012)

摘要 为满足深空探测全景相机的高精度标定要求, 针对大型室外三维标定靶标构建困难、不能现场标定, 平面棋盘靶标标定精度不高等问题, 提出了一种基于圆形标志点的相机标定方法。大量圆形标志点按矩阵形式均匀分布在平面靶标上, 以其中一个圆形标志点为原点建立世界坐标系。基于相机成像模型及物点、相机原点、像点的共线性约束, 以投影误差最小作为目标函数, 采用非线性优化方法得到了相机参数的最优解。标定实验结果显示所提标定方法可行、有效, 具有较高的标定精度和较好的稳健性, 相机参数的标定精度优于 0.3 pixel; 采用的畸变模型合适, 标志点投影误差优于 0.07 pixel。

关键词 机器视觉; 相机标定; 圆形标志点; 全景相机; 平面靶标; 镜头畸变

中图分类号 TP391.41 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201333.1115002

Deep Space Exploration Panoramic Camera Calibration Technique Based on Circular Markers

Wu Fanlu^{1,2} Liu Jianjun^{1,3} Ren Xin^{1,3} Li Chunlai^{1,3}

¹ National Astronomical Observatories, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100012, China

² University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

³ Key Laboratory of Lunar and Deep Space Exploration, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100012, China

Abstract Considering the difficulties in construction and on-site processing of outdoor three-dimensional calibration target, and the low precision of chessboard target, a new camera calibration method based on circular markers is put forward to meet the high-precision of panoramic camera for deep space explorations. A large number of circular markers are distributed on the target in matrix form, one of which is taken as the origin of world coordinate system. Based on the camera model and collinearity of object point, camera origin, and image point, the optimal camera parameters are obtained with nonlinear optimization method, which use minimizing projection error as objective function. Experimental results show that this method with higher precision and better robustness is feasible and effective. The accuracy is better than 0.3 pixel. The distortion model is suitable and the projection error is better than 0.07 pixel.

Key words machine vision; camera calibration; circular marker; panoramic camera; planar target; lens distortion

OCIS codes 150.0155; 150.1488; 040.1520; 100.2000

1 引言

月球车、火星车等巡视探测器携带科学探测仪器在地外天体的表面进行巡视探测^[1-5]。其中全景相机的主要功能是对行星表面复杂环境进行有效地

感知和信息融合^[6], 获取高分辨率的巡视区行星表面三维光学图像^[7], 和其他载荷配合共同完成巡视区地形地貌、撞击坑、地质构造以及综合研究的科学目标^[8-9]。

收稿日期: 2013-05-17; **收到修改稿日期**: 2013-06-08

基金项目: 国家重大专项(探月工程)、国家自然科学基金(11273037)

作者简介: 吴凡路(1988—), 男, 硕士研究生, 主要从事双目立体视觉、全景镶嵌等方面的研究。

E-mail: wufl@nao.cas.cn

导师简介: 李春来(1965—), 男, 硕士, 研究员, 主要从事月球与深空探测、陨石学、行星遥感等方面的研究。

E-mail: licl@nao.cas.cn

计算机立体视觉系统从获取的图像信息出发,计算空间环境中物体的位置、形状等几何信息,并由此重建和识别环境中的物体。完成上述任务的关键步骤是相机几何参数标定,即建立像点图像坐标与物点三维空间坐标之间的关系,这是由相机成像模型所决定的。相机标定可分为基于靶标的标定方法^[10-15]和自标定方法^[16-19]两类。基于靶标的标定方法利用一个结构已知、高精度的定标参照物作为标定靶标,通过物点和像点之间的对应关系来建立相机成像模型参数的约束,利用优化算法来求解这些参数。该方法的优点是标定精度高,缺点是大型室外三维标定靶标构建困难、成本高,无法移动实现现场标定;若采用平面棋盘靶标,标定算法对噪声和图像质量比较敏感,易引起特征点提取精度的下降^[20],且尺寸相对较小时标定精度也会降低^[21]。自标定方法不依赖于标定参照物,仅利用相机拍摄的多幅图像同名点的对应关系来标定相机参数。由于只是利用了相机内参数自身存在的约束,所以该方法灵活方便,但精度不高、稳健性差,不适用于要求高精度标定的深空探测全景相机。

大型室外三维标定靶标的成像基站在很大的空间范围呈三维分布,总体组装完成后全景相机安装于巡视探测器桅杆的顶端,很难实现在每个基站都成像,且全景相机也无法绕光轴旋转变换姿态。为了科学目标的顺利实现,在巡视探测器发射前需对全景相机进行几何标定。为了满足全景相机的高精度标定要求,本文提出了一种基于圆形标志点的标

定方法。该方法根据全景相机的视场范围对标定标志、拍摄基站进行优化设计,利用被标定全景相机在平面靶标前方多种距离、多个基站、多种姿态、多种角度依次成像,以投影误差最小作为目标函数,通过 Levenberg-Marquardt 优化方法^[22]精确求解相机参数。

2 标定方法

2.1 相机成像模型

实际的成像系统并不是理想的透视投影(小孔成像模型),相机内部参数除包含有效焦距 f 与像主点坐标外,还含有径向畸变、离心畸变、CCD 面阵变形等补偿修正项。以 Brown 模型^[23]为基础,采用畸变模型:

$$\begin{cases} x'_c = x - x_0 - \Delta x = (u - u_0)d_x - \Delta x, \\ y'_c = y - y_0 - \Delta y = (v - v_0)d_y - \Delta y, \\ z'_c = -f, \end{cases} \quad (1)$$

式中 (x'_c, y'_c, z'_c) 为理想像点在相机坐标系中的坐标, (x, y) 为实际像点的像面坐标, (x_0, y_0) 为像主点(即光轴与像平面的交点)的像面坐标, (u, v) 为特征像点的像素坐标, (u_0, v_0) 为像主点的像素坐标, (d_x, d_y) 为水平和垂直方向的像元几何尺寸, $(\Delta x, \Delta y)$ 为径向畸变、离心畸变和 CCD 面阵变形等引起的实际像点偏离其理想像点的偏移量。相机成像模型如图 1 所示。

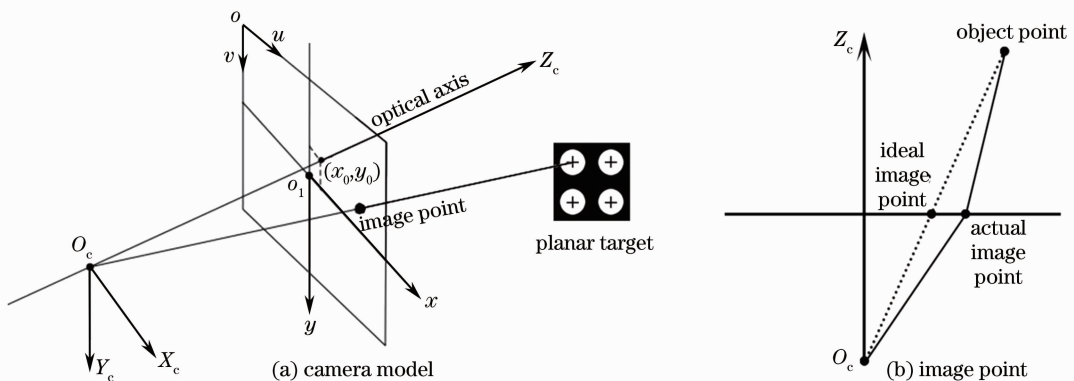


图 1 相机成像模型

Fig. 1 Imaging model of camera

由像差理论可知,高级畸变系数对畸变量的影响相对于低级畸变系数要小很多,通常忽略高级畸变。目前光学成像系统的设计、加工及安装都可以达到很高的精度,因此薄棱镜畸变很微小。在达到深空探测全景相机预期标定精度的情况下,为了提

高标定效率及算法的稳健性,畸变模型中只考虑前三级径向畸变 (k_1, k_2, k_3) 、前两级离心畸变 (p_1, p_2) 和 CCD 面阵变形 (b_1, b_2) ,忽略薄棱镜畸变、高级径向及离心畸变^[12,23],则实际像点偏离其理想像点的偏移量为

$$\begin{cases} \Delta x = (x - x_0)(k_1 r^2 + k_2 r^4 + k_3 r^6) + p_1[r^2 + 2(x - x_0)^2] + 2p_2(x - x_0)(y - y_0) + b_1(x - x_0) + b_2(y - y_0) \\ \Delta y = (y - y_0)(k_1 r^2 + k_2 r^4 + k_3 r^6) + p_2[r^2 + 2(y - y_0)^2] + 2p_1(x - x_0)(y - y_0) + b_1(y - y_0) + b_2(x - x_0) \end{cases}, \quad (2)$$

式中 $r = \sqrt{(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2}$ 为像点到相机光轴的径向距离。

2.2 相机参数优化求解

根据理想小孔成像模型,空间特征点、相机光心、特征像点满足共线性约束,共线性方程为

$$\begin{cases} x'_c = -f \frac{r_{11}(X_w - X_0) + r_{12}(Y_w - Y_0) + r_{13}(Z_w - Z_0)}{r_{31}(X_w - X_0) + r_{32}(Y_w - Y_0) + r_{33}(Z_w - Z_0)} \\ y'_c = -f \frac{r_{21}(X_w - X_0) + r_{22}(Y_w - Y_0) + r_{23}(Z_w - Z_0)}{r_{31}(X_w - X_0) + r_{32}(Y_w - Y_0) + r_{33}(Z_w - Z_0)} \end{cases}, \quad (3)$$

式中 (X_w, Y_w, Z_w) 为空间特征点在世界坐标系中的坐标, (X_0, Y_0, Z_0) 为相机坐标系原点在世界坐标系中的坐标, $r_{11}, r_{12}, \dots, r_{33}$ 为世界坐标系到相机坐标系的旋转矩阵的元素。由欧氏空间的刚体变换可知旋转矩阵中的元素均可由 3 个旋转角 $(\omega, \varphi, \kappa)$ 来表示。

当采用畸变模型时,由实际像点的像面坐标 (x, y) 可得理想像点的像面坐标 $(x - \Delta x, y - \Delta y)$,进而根据(1)式可得理想像点在相机坐标系中水平和垂直方向的坐标 (x'_c, y'_c) ,代入(3)式即可得实际的共线性方程

$$\begin{cases} x = x_0 + \Delta x - f \frac{r_{11}(X_w - X_0) + r_{12}(Y_w - Y_0) + r_{13}(Z_w - Z_0)}{r_{31}(X_w - X_0) + r_{32}(Y_w - Y_0) + r_{33}(Z_w - Z_0)} \\ y = y_0 + \Delta y - f \frac{r_{21}(X_w - X_0) + r_{22}(Y_w - Y_0) + r_{23}(Z_w - Z_0)}{r_{31}(X_w - X_0) + r_{32}(Y_w - Y_0) + r_{33}(Z_w - Z_0)} \end{cases}. \quad (4)$$

建立以投影误差最小的目标函数

$$\min F(f, x_0, y_0, k_1, k_2, k_3, p_1, p_2, b_1, b_2, X_0, Y_0, Z_0, \omega, \varphi, \kappa) = \min \sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n \| (u'_{ij}, v'_{ij}) - (u'_{ij}, v'_{ij}) \|, \quad (5)$$

式中 (u_{ij}, v_{ij}) 为实际像点的像素坐标, (u'_{ij}, v'_{ij}) 为空间特征点经畸变模型投影的投影像点的像素坐标,空间特征点即标定靶标上圆形标志的圆心, i 为空间特征点的编码, j 为获取图像的序号。

采用参考文献[22]中的 Levenberg-Marquardt 算法即可求得相机参数的最优解、投影误差,迭代求解的过程为

1) 指定相机参数的初始值 $\delta_0 = (f, x_0, y_0, k_1, k_2, k_3, p_1, p_2, b_1, b_2, X_0, Y_0, Z_0, \omega, \varphi, \kappa)$ 、投影误差的初始值 s 、正规矩阵中的因子 λ 及增长因子 u 。基于(4)式利用直接线性变换方法获得相机参数的初始值 δ_0 ,令 $s = 0, \lambda = 0.001, u = 10$ 。

2) 根据当前估计值 δ_k 、空间特征点及像点的坐标,构成正规方程。

3) 对正规方程求解得到校正向量 $\Delta\delta$ 。

4) 如果 $s(\delta_k + \Delta\delta) \geq s(\delta_k)$,则 $\lambda = u\lambda$,返回第 3) 步重新计算。

5) 如果 $s(\delta_k + \Delta\delta) \leq s(\delta_k)$,则 $\lambda = \lambda/u$,对参数进行校正 $\delta_{k+1} = \delta_k + \Delta\delta$ 。

6) 如果 $\Delta\delta$ 小于设定的收敛极限,输出当前估计值 δ_{k+1} ,否则返回第 2) 步进行下一次迭代。

2.3 标定实验设计

提出的深空探测全景相机标定方法采用圆形标志的圆心作为特征点,可保证特征点提取的精度,也可削弱尺寸过大时圆形标志投影成椭圆引起的特征点偏移误差。经实验分析,图像中圆形标志的尺寸一般应设计为大于 15 pixel 小于 60 pixel,综合考虑全景相机的最佳成像范围、像元大小,圆形标志的直径设计为 20 mm。如图 2(a)所示,750 个圆形标志按矩阵形式均匀分布在平面靶标上,平面靶标大小为 1.2 m×1.0 m。以平面靶标上的一个圆形标志点为原点建立世界坐标系,同时约定标志点的编码顺序,如图 2(b)所示。利用高精度全站仪测量靶标上各特征点相对世界坐标系原点的位置,则在标定实验中所有特征点的世界坐标均为已知量。

为了克服平面靶标深度信息的不足并弱化参数间的相关性,在进行标定时要求全景相机应在最佳成像范围 3~9 m 的不同深度位置对标定靶标进行成像。在同一深度位置应设置 3 个基站,每个基站处全景相机的光轴与平面靶标法线的夹角不同,这样就形成了交向成像。

同时为了削弱畸变的非均匀性及其他未考虑的

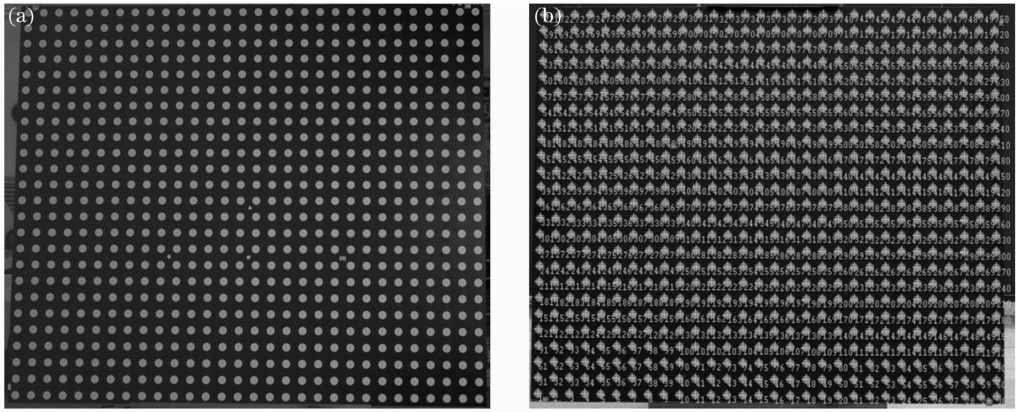


图 2 (a)平面靶标; (b)标志点编码

Fig. 2 (a) Planar target; (b) encoded markers

非模型化畸变对标定结果的影响,在每个基站处平面靶标须依次绕法线旋转 90° 共 4 种姿态进行成像。

相机的畸变量随着距光轴的径向距离的增大而增大,而在最佳成像范围内标定靶标的尺寸相对于相机的视场而言要小很多。为了充分标定视场边缘

的畸变量,实验过程中需多次成像以保证圆形标志覆盖相机的整个视场,如图 3 所示。图 3 中实线框为全景相机的视场,虚线框为每幅图像中标定靶标在视场中的位置。标定实验时全景相机安置于云台上,在每种姿态下按图 3 所示微调云台进行 5 次成像。

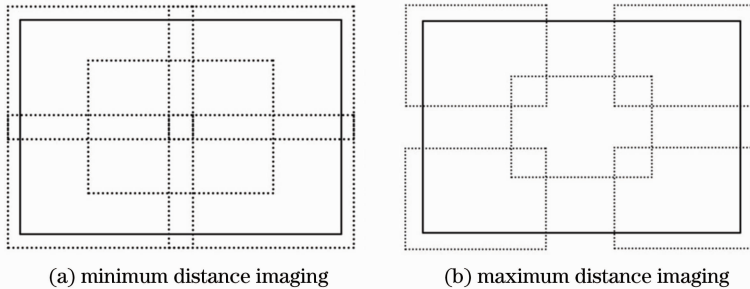


图 3 视场覆盖示意图

Fig. 3 Schematic of field covers

综合考虑光照条件的变化、拍摄基站的小尺度变化(世界坐标系内三个方向的变化均小于 $\pm 0.1\text{ m}$)、人为误差的变化对标定精度的影响,相机标定过程中,应在不同光照条件且拍摄基站没有严格限定的情况下由不同实验人员分三组进行标定,然后对三组实验数据进行对比分析。三组实验的光照条件分别为室内光照、室外顺光、室外侧光。

3 实验结果

采用两台配有卡尔·蔡司公司生产的 Planar T* 50 mm $f/1.4$ ZE 型定焦镜头的 Canon 5D Mark II 型相机作为深空探测全景相机的原理样机,其技术参数如表 1 所示。

标定过程中,镜头与机身之间的缝隙会引起它们相对位置的变动使相机参数发生变化。为削弱位置变动对标定结果的影响,对相机进行了严格的机械固定,如图 4 所示。表 2 为左相机三组实验的标

定结果。

表 1 全景相机技术参数

Table 1 Technical parameters of panoramic camera

Item	Data
Number of pixels /pixel	5616×3744
Size of pixel / μm	6.4
Focal length /mm	50



图 4 全景相机示意图

Fig. 4 Schematic of panoramic camera

表2 全景相机标定结果
 Table 2 Calibration results of panoramic camera

Parameters	1	2	3	Average	Standard deviation
f/mm	51.981000	51.977000	51.981000	51.979667	0.001886
x_0/mm	-0.076920	-0.075853	-0.078401	-0.077058	0.001045
y_0/mm	-0.062019	-0.062081	-0.064909	-0.063003	0.001348
$k_1/10^{-5}$	4.9676	4.8941	4.9086	4.9234	0.0318
$k_2/10^{-9}$	2.4754	4.5134	4.3612	3.7833	0.9269
$k_3/10^{-11}$	-2.2052	-2.4763	-2.4328	-2.3714	0.1189
$p_1/10^{-6}$	-2.9317	-3.4791	-3.4897	-3.3002	0.2606
$p_2/10^{-6}$	5.4778	5.1125	5.4852	5.3585	0.1740
$b_1/10^{-5}$	2.1284	2.2292	4.6815	3.0130	1.1805
$b_2/10^{-5}$	5.5866	4.8685	5.1308	5.1953	0.2967
Residuals/ μm	0.34	0.39	0.36	0.363	0.021

由表2可知,不同影像组解算出的相机参数有一定的差异,这是由于相机参数之间存在较强的相关性,基站布局发生变化时必然引入一定的差异,此外光照条件的变化也会引起特征点提取精度的细微变化从而引入差异。但三组结果中有效焦距 f 与像主点位置 x 方向、 y 方向的标准差均小于 $1.92\ \mu\text{m}$ ($0.3\ \text{pixel}$),经计算可知像主点总的标准差同样小于 $1.92\ \mu\text{m}$ ($0.3\ \text{pixel}$),特征点投影误差均小于 $0.448\ \mu\text{m}$ ($0.07\ \text{pixel}$),这表明三组参数虽然有所差异但差异较小。

为进一步验证标定结果的正确性并分析相机参

表3 影像几何校正前后标定结果比较

Table 3 Comparison of calibration results between raw image and geometric corrected image

Parameters	1		2		3	
	Raw	Corrected	Raw	Corrected	Raw	Corrected
f/mm	51.981000	51.980000	51.977000	51.977000	51.981000	51.982000
x_0/mm	-0.076920	0.000331	-0.075853	-0.000625	-0.078401	-0.001015
y_0/mm	-0.062019	0.000871	-0.062081	0.000892	-0.064909	-0.000284
$k_1/10^{-8}$	4967.6	0.5285	4894.1	0.1029	4908.6	1.9063
$k_2/10^{-11}$	247.54	-9.4342	451.34	-2.1170	436.12	-5.9842
$k_3/10^{-14}$	-2205.2	-2.7075	-2476.3	-0.4336	-2432.8	3.5585
$p_1/10^{-7}$	-29.317	0.4025	-34.791	2.8705	-34.897	3.3306
$p_2/10^{-7}$	54.778	-3.0559	51.125	-2.2242	54.852	-0.9989
$b_1/10^{-6}$	21.284	-0.1739	22.292	-0.2240	46.815	-2.5898
$b_2/10^{-6}$	55.866	-1.3350	48.685	1.8374	51.308	-1.1759
Residuals/ μm	0.34	0.32	0.39	0.37	0.36	0.35

基于畸变模型和参考文献[23],径向畸变、离心畸变可表示为

$$\begin{cases} d_r = k_1 r^3 + k_2 r^5 + k_3 r^7, \\ P(r) = (p_1^2 + p_2^2)^{1/2} r^2. \end{cases} \quad (6)$$

以第三组标定实验为例,几何校正前后径向畸变、离心畸变随径向距离的变化分别如图5、图6所示。

通过对比几何校正前后标定结果及径向畸变、

数的标定精度,采用上述标定参数对原始影像进行几何校正,然后对校正后影像重新进行解算。假设原始影像的标定参数是正确的,则理论上重新解算的有效焦距基本保持不变,像主点坐标、径向畸变量、离心畸变量接近于零。一般情况下,校正后影像的整像素点坐标对应与原始影像的非整像素点坐标,因此需要进行插值。综合考虑插值效果与计算量,本文采用双线性插值法进行插值。三组原始影像分别利用各自参数进行几何校正,校正前后的标定结果如表3所示。

离心畸变曲线,可知几何校正后有效焦距基本保持不变,像主点坐标均小于 $1.28\ \mu\text{m}$ ($0.2\ \text{pixel}$),其他参数也都大幅减小,尤其是径向畸变系数。最大径向畸变量已不足 $0.005\ \text{pixel}$,最大离心畸变量已不足 $0.05\ \text{pixel}$,校正效果较好。校正后影像的标定结果进一步证明了采用基于圆形标志点的平面靶标高精度标定深空探测全景相机的可行性。

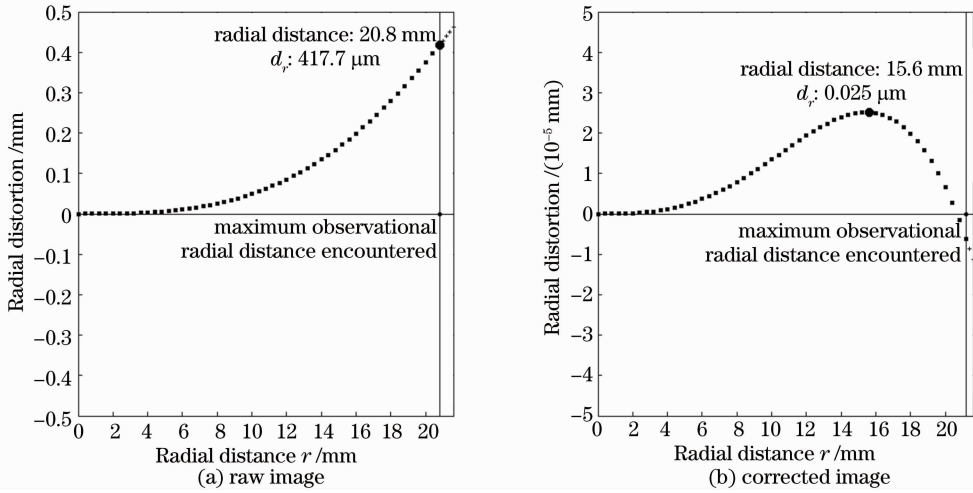


图 5 径向畸变曲线

Fig. 5 Radial distortion curves

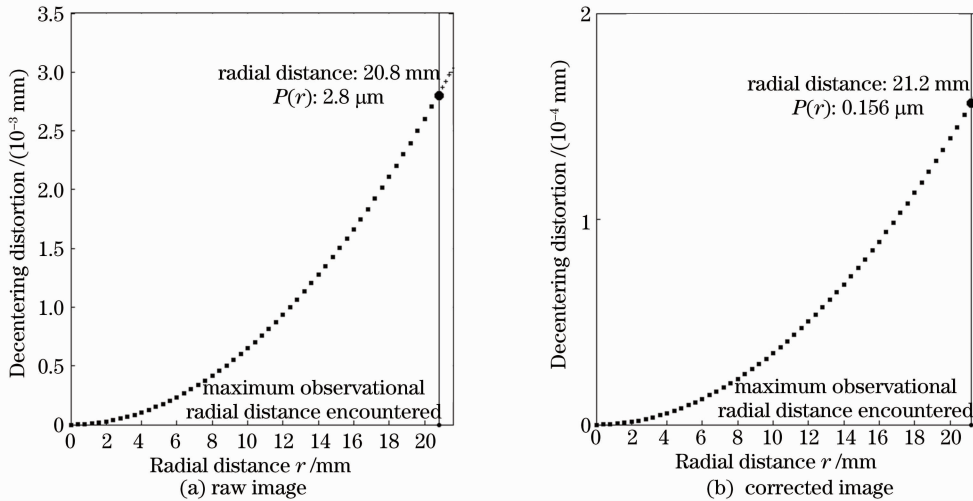


图 6 离心畸变曲线

Fig. 6 Decentering distortion curves

实验表明,本文所提标定方法可行、有效,具有较高的标定精度和较好的稳健性,特征点投影误差小于 0.07 pixel,相机参数的标定精度优于 0.3 pixel。

4 结 论

提出了一种基于圆形标志点的深空探测全景相机标定方法,并进行了实验验证。利用多种距离、多个基站、多种姿态、多种角度成像的方法,克服了平面靶标深度信息的不足及尺寸的限制,可实现全景相机的高精度标定。实验结果表明,该方法的标定精度优于 0.3 pixel。但由于参与解算的影像、标志点较多,耗时较长,在满足精度要求的情况下为了提高标定效率,未来的工作将进一步对成像距离、基站、姿态、角度的设置加以优化,并对平面靶标上的圆形标志点数目及分布间距进行优化。

参 考 文 献

- 1 J F Bell III, S W Squyres, K E Herkenhoff, *et al.*. Mars exploration rover Athena panoramic camera (Pancam) investigation [J]. *J Geophys Res*, 2003, 108(E12): 8063.
- 2 J N Maki, J F Bell III, K E Herkenhoff, *et al.*. Mars exploration rover engineering cameras [J]. *J Geophys Res*, 2003, 108(E12): 8071.
- 3 J Maki, D Thiessen, A Pourangi, *et al.*. The Mars science laboratory engineering cameras [J]. *Space Science Reviews*, 2012, 170(1-4): 77-93.
- 4 J F Bell III, S W Squyres, R E Arvidson, *et al.*. Pancam multispectral imaging results from the Spirit rover at Gusev crater [J]. *Science*, 2004, 305(5685): 800-806.
- 5 J F Bell III, S W Squyres, R E Arvidson, *et al.*. Pancam multispectral imaging results from the Opportunity rover at Meridiani planum [J]. *Science*, 2004, 306(5702): 1703-1709.
- 6 Zhi Minhui. The Research of Binocular Stereo Vision System for Lunar Rover [D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2007. 1-15.

支敏慧. 月球探测车双目立体视觉系统研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2007. 1-15.

- 7 D A Alexander, R G Deen, P M Andres, *et al.*. Processing of Mars exploration rover imagery for science and operations planning [J]. *J Geophys Res*, 2006, 111(E02S02): 1–21.
- 8 Ouyang Ziyuan. Introduction to Lunar Science [M]. Beijing: China Astronautics Publishing House, 2005. 304–318.
 欧阳自远. 月球科学概论[M]. 北京: 中国宇航出版社, 2005. 304–318.
- 9 Ye Peijian, Rao Wei. Application of photoelectricity technology for deep space exploration in China [J]. *Spacecraft Recovery and Remote Sensing*, 2011, 32(2): 1–11.
 叶培建, 饶伟. 光电技术在中国深空探测中的应用[J]. *航天返回与遥感*, 2011, 32(2): 1–11.
- 10 R Y Tsai. A versatile camera calibration technique for high-accuracy 3D machine vision metrology using off-the-shelf TV cameras and lenses [J]. *IEEE J Robotics and Automation*, 1987, 3(4): 323–344.
- 11 Z Zhang. A Flexible New Technique for Camera Calibration [R]. Technical Report MSR-TR-98-71, Microsoft Research, 1998.
- 12 J Weng, P Coben, M Herniou. Camera calibration with distortion models and accuracy evaluation [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1992, 14(10): 965–980.
- 13 Liu Zhen, Shang Yanna. Novel calibration method for stereo vision sensor using flexible target [J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(3): 0315001.
 刘震, 尚砚娜. 立体视觉传感器的一种灵活靶标新标定方法[J]. *光学学报*, 2013, 33(3): 0315001.
- 14 Sun Nan, Zhang Liyan, Ye Nan, *et al.*. Calibration of binocular stereo measurement system based on calibration cross [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(4): 0412001.
 孙楠, 张丽艳, 叶南, 等. 基于十字靶标的双目立体测量系统标定[J]. *光学学报*, 2012, 32(4): 0412001.
- 15 Wang Huifeng, Wang Bingjian. Camera radial distortion calibrating method based on moving characteristic target [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(5): 0512007.
 王会峰, 王炳健. 移动特征靶标的摄像机径向畸变标定[J]. *光学学报*, 2012, 32(5): 0512007.
- 16 S J Maybank, O D Faugeras. A theory of self-calibration of a moving camera [J]. *International J Computer Vision*, 1992, 8(2): 123–151.
- 17 R Hartley. Kruppa's equations derived from the fundamental matrix [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1997, 19(2): 133–135.
- 18 S D Ma. A self-calibration technique for active vision systems [J]. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 1996, 12(1): 114–120.
- 19 Hu Zhanyi, Wu Fuchao. A review on some active vision based camera calibration techniques [J]. *Chinese J Computers*, 2002, 25(11): 1149–1156.
 胡占义, 吴福朝. 基于主动视觉摄像机标定方法[J]. *计算机学报*, 2002, 25(11): 1149–1156.
- 20 Xia Renbo, Liu Weijun, Zhao Jibin, *et al.*. Fully automatic camera calibration method based on circular markers [J]. *Chinese J Scientific Instrument*, 2009, 30(2): 368–373.
 夏仁波, 刘伟军, 赵吉宾, 等. 基于圆形标志点的全自动相机标定方法[J]. *仪器仪表学报*, 2009, 30(2): 368–373.
- 21 Sun Junhua, Liu Zhen, Zhang Guangjun, *et al.*. Camera calibration based on flexible 3D target [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, 29(12): 3433–3439.
 孙军华, 刘震, 张广军, 等. 基于柔性立体靶标的摄像机标定[J]. *光学学报*, 2009, 29(12): 3433–3439.
- 22 J J More. The Levenberg-Marquardt algorithm; implementation and theory [J]. *Numerical Analysis*, 1978, 630: 105–116.
- 23 J G Fryer, D C Brown. Lens distortion for close-range photogrammetry [J]. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 1986, 52(1): 51–58.

栏目编辑: 张腾