

一种基于光场图像的聚焦光场相机标定方法

孙俊阳, 孙 俊, 许传龙, 张 彪, 王式民

东南大学能源与环境学院, 江苏 南京 210096

摘要 基于光场成像技术的场景三维深度重建,需标定光场相机的几何参数。本文提出一种基于原始光场图像的聚焦光场相机的标定方法。拍摄标定板不同旋转角度的原始光场图像;根据图像上像点与虚拟像点(像点关于微透镜的共轭点)的共轭关系,计算得到虚拟像点的坐标;根据标定板上角点与虚拟像点的共轭关系,建立聚焦光场相机标定模型;利用 Levenberg-Marquardt 算法求解标定模型,进行标定实验;比较所提方法与基于全聚焦图像的标定方法的标定参数。结果表明,原始光场图像与全聚焦图像对应的虚拟像点(角点关于主透镜的共轭点)之间的误差小于 21 pixel,角点的标定误差小于 3%,基于原始光场图像和全聚焦图像方法获得的结构参数和外部参数具有较好的一致性,表明基于原始光场图像的标定方法的可行性。

关键词 机器视觉; 聚焦光场相机; 全聚焦图像; 虚拟像点; 标定方法

中图分类号 TB391.4 文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201737.0515002

A Calibration Method of Focused Light Field Cameras Based on Light Field Images

Sun Junyang, Sun Jun, Xu Chuanlong, Zhang Biao, Wang Shimin

School of energy and environment, Southeast University, Nanjing, Jiangsu 210096, China

Abstract In the three-dimensional depth reconstruction of the scene based on light field photography, it is necessary to calibrate the geometric parameters of light field cameras. In this paper, a calibration method of focused light field cameras is proposed based on Jiangsu raw light field images. The raw light field images of a calibration board with different orientations are captured. According to the conjugation relationship between image points and virtual image points (conjugation points of image points for the microlens), the coordinates of the virtual image points are calculated. The calibration model of focused light field cameras is established according to the conjugation relationship between the corner points on the calibration board and the virtual image points. The model is then solved by Levenberg-Marquardt algorithm. Calibration experiments are carried out. The accuracy of the proposed method is compared to that of the calibration method based on the total focused images. Experimental results show that the error between the virtual image points obtained from raw light field images and those (conjugation points of corner points for mainlens) from total focused images is less than 21 pixels. The relative calibration errors of the corner points are less than 3%. The calibrated configuration parameters and external parameters from raw light field images are in good consistence with those from total focused images. The proposed method is proved to be effective calibrating the focused light field cameras.

Key words machine vision; focused light field camera; total focused image; virtual image point; calibration method

OCIS codes 150.1488; 150.0155; 100.2000

1 引 言

三维重建技术利用相机作为图像传感器,结合图像处理、视觉计算等技术,可获取物体的三维几何信息,被广泛应用于工业制造、机器人视觉等领域^[1-3]。相机标定是通过空间目标点的三维信息以及对应的图像二维信

收稿日期: 2016-11-30; 收到修改稿日期: 2017-01-06

基金项目: 国家自然科学基金(51676044,51506030,51327803)、江苏省自然科学基金杰出青年基金(JL150501)

作者简介: 孙俊阳(1993—),男,硕士研究生,主要从事火焰三维温度场测量方面的研究。E-mail: 1039227684@qq.com

导师简介: 许传龙(1978—),男,博士,教授,博士生导师,主要从事多相流测试、燃烧诊断技术等方面的研究。

E-mail: chuanlongxu@seu.edu.cn(通信联系人)

息求解相机几何参数的过程^[4]。相机标定结果的准确性在很大程度上制约着三维重建的精度^[5]。因此,准确的相机参数标定是三维重建中必不可少的步骤。光场相机能够记录三维空间中光线的位置和角度信息,重建场景的三维深度信息^[6]。光场的概念最早由 Gershun^[7-8] 提出,用以描述光在三维空间中辐射传输特性。Ng 等^[9] 在主镜头和相机成像探测器之间放置微透镜阵列,研制出光场相机,实现了单相机的光场获取,但是这种传统光场相机的分辨率较低。Georgiew 等^[10-11] 提出了光场相机 2.0 的设计,也称为聚焦光场相机。聚焦光场相机的成像探测器不在微透镜阵列的焦面上,减少了光线方向维度的采样,用较低的方向分辨率换取相对更高的空间分辨率,有效提高了重聚焦图像的成像分辨率。在基于聚焦光场相机的三维深度重建中,需要对聚焦光场相机的几何参数进行标定,如微透镜与成像探测器的距离、主透镜等效平面与微透镜的距离等。

对传统相机的标定研究较多。Zhang^[12] 通过拍摄不同角度的标定板图像,根据标定板角点与图像中的像点之间的坐标关系来完成传统相机的标定。Yang 等^[13] 根据基于 Tsai 算法的相机径向畸变模型,利用径向排列约束完成传统相机标定。传统相机不含有微透镜阵列,其标定方法不能直接用于光场相机的标定。目前关于光场相机标定的研究相对较少。Bok 等^[14] 提出了利用线性特征对传统光场相机(Lytro 光场相机)进行标定的方法可直接用于聚焦光场相机的标定,原因是聚焦光场相机的成像探测器不在微透镜阵列焦面上,且相机的原始光场图像有可识别的角点。Strobl 等^[15] 提出利用原始光场图像重聚焦后得到的全聚焦图像(图像上各点均聚焦)进行标定,由于其标定模型不包含微透镜的成像关系,无法确定微透镜的几何参数。Johannsen 等^[16] 利用序列二次规划(SQP)优化算法求解标定模型对聚焦光场相机进行标定,由于该算法对各待标定参数初值的准确性有较高的要求,容易陷入局部最优。

针对以上问题,本文在传统相机标定的基础上,提出了一种基于原始光场图像的聚焦光场相机几何参数标定方法,根据角点与虚拟像点之间关于主透镜的共轭关系,建立,利用 Levenberg-Marquardt 算法求解标定,获得聚焦光场相机的结构参数和外部参数,通过与全聚焦图像的标定结果进行对比,验证该方法的可行性与准确性。

2 标定原理

2.1 标定模型

图 1 为两种不同结构的聚焦光场相机示意图^[17]。图 1(a)为开普勒结构,微透镜阵列与成像探测器的距离 l_a 小于微透镜的焦距 f ;图 1(b)为伽利略结构,微透镜阵列与成像探测器的距离 l_a 大于微透镜的焦距 f 。图 2 为聚焦光场相机标定模型示意图。将主透镜和微透镜看作两个独立的成像单元,角点 M 的成像过程分为两步:1) 由主透镜成像;2) 由微透镜阵列成像。角点 M 所在的物面关于主透镜成像系统有一个共轭像面。由于没有成像探测器来记录这一像面,所以称为虚拟像面。 m' 是角点 M 关于主透镜共轭的虚拟像点。虚拟像面关于微透镜阵列成像系统有一个共轭面,即成像探测面。图 1 中, L (主透镜与微透镜间的距离)、 S (虚拟像面与微透镜间的距离)和 l 为聚焦光场相机待标定的结构参数, l' 表示的主透镜与物面间的距离。

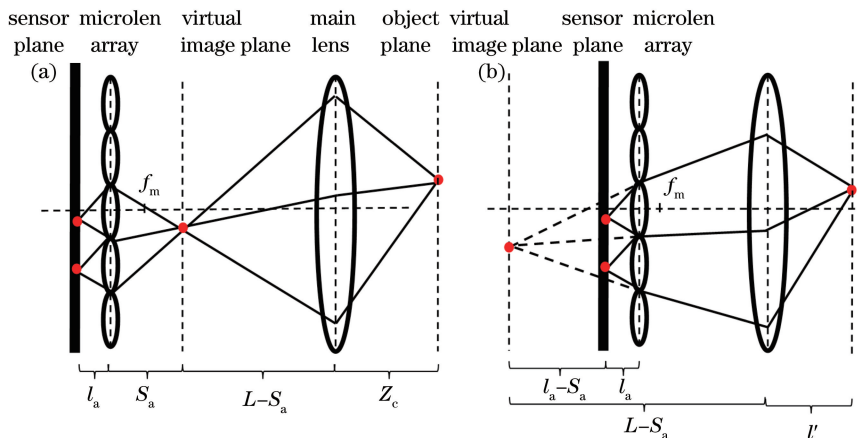


图 1 聚焦光场相机示意图。(a)开普勒结构;(b)伽利略结构

Fig. 1 Schematic of the focused light field cameras. (a) Keplerian configuration; (b) Galilean configuration

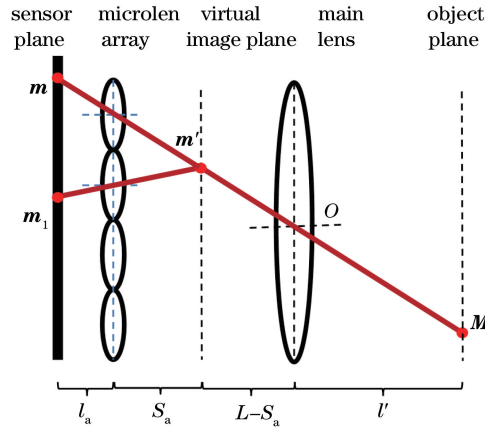


图 2 聚焦光场相机标定模型

Fig. 2 Diagram of calibration model of the focused light field camera

为了建立关联上述结构参数的标定模型,分别定义了相机坐标系、图像坐标系和世界坐标系。相机坐标系以主透镜的中心 O 作为原点, X_c 、 Y_c 轴平行于成像探测器平面, Z_c 轴垂直于成像探测器平面,单位为 mm。图像坐标系以成像探测器中心为坐标原点, x 、 y 、 z 轴分别平行于相机坐标系的 X_c 、 Y_c 、 Z_c 轴,单位为 pixel。世界坐标系以标定板上的点为坐标原点, X_w 、 Y_w 轴平行于标定板, Z_w 轴垂直于标定板,单位为 mm。根据图 2 中标定板上角点 M 与其共轭像点 m' 关于主透镜的共轭关系,建立标定模型为

$$s \tilde{m}' = A [R \quad t] \tilde{M}, \quad (1)$$

式中 s 为比例系数; \tilde{m}' 为虚拟像点 m' 的坐标向量; \tilde{M} 为角点 M 的坐标向量; A 为内部参数矩阵; $[R \quad t]$ 为外部参数矩阵。

$$\tilde{m}' = \left\{ -\frac{S_a}{l_m} \left[u - \left(1 + \frac{l_a}{S_a} \right) M_u \right], -\frac{S_a}{l_a} \left[v - \left(1 + \frac{l_a}{S_a} \right) M_v \right], 1 \right\}, \quad (2)$$

$$\tilde{M} = [X_w, Y_w, Z_w, 1]^T, \quad (3)$$

$$\beta_m = \frac{l_a}{S_a} = \frac{u - u_1}{M_u - M_{u1}} - 1, \quad (4)$$

$$A = \begin{bmatrix} \alpha & \gamma & u_0 \\ 0 & \beta & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (5)$$

$$\alpha = (L - S_a)/(dx), \quad (6)$$

$$\beta = (L - S_a)/(dy), \quad (7)$$

$$\gamma = (L - S_a) \tan a / (dy), \quad (8)$$

式中 (u, v) 为像点 m 在图像坐标系下的坐标; (M_u, M_v) 是像点 m 对应的微透镜中心在图像坐标系下的坐标; l_a/S_a (β') 为微透镜的放大率; u_1 为像点 m_1 在图像坐标系下的坐标; M_{u1} 为像点 m_1 对应的微透镜中心在图像坐标系下的坐标; u_0 、 v_0 为主透镜中心 O 在图像坐标系下的坐标; α 、 β 为图像坐标系中两坐标轴 (x 和 y) 的比例因子; γ 为两坐标轴 (x 和 y) 的扭曲参数; $dx \times dy$ 为像素的尺寸; a 为图像坐标系中两图像坐标轴 (x 和 y) 的不垂直性倾斜角。

R 和 t 分别为世界坐标系和相机坐标系的坐标旋转和平移变换矩阵,表示为

$$R = [r_1 \quad r_2 \quad r_3] = \begin{bmatrix} \cos q_2 \cos q_1 & \sin q_2 \cos q_1 & -\sin q_1 \\ -\sin q_2 \cos q_3 + \cos q_2 \sin q_1 \sin q_3 & \cos q_2 \cos q_3 + \sin q_2 \sin q_1 \sin q_3 & \cos q_1 \sin q_3 \\ \sin q_2 \sin q_3 + \cos q_2 \sin q_1 \cos q_3 & -\cos q_2 \sin q_3 + \sin q_2 \sin q_1 \cos q_3 & \cos q_1 \cos q_3 \end{bmatrix}, \quad (9)$$

$$t = [t_x \quad t_y \quad t_z], \quad (10)$$

式中 q_1 、 q_2 和 q_3 表示标定板与聚焦光场相机的相对位置参数, t_x 、 t_y 和 t_z 为聚焦光场相机待标定的外部参

数。相机坐标系依次绕 x 、 y 、 z 坐标轴旋转 3 个角度 q_1 、 q_2 、 q_3 ，并且依次沿 x 、 y 、 z 坐标轴方向平移 3 个距离 t_x 、 t_y 、 t_z 可以得到世界坐标系。 t_z 为标定板的深度，即标定板与相机主透镜等效面的沿 z 轴的距离。

2.2 标定模型求解

用聚焦光场相机拍摄同一深度下不同偏转角度的标定板原始光场图像，根据原始光场图像中的像点 m 坐标 (u, v) 和角点 \mathbf{M} 坐标 (X_w, Y_w, Z_w) 求解标定模型(1)式，得到聚焦光场相机的内部参数 \mathbf{A} 和外部参数 $[\mathbf{R} \quad \mathbf{t}]$ ，进一步计算得到结构参数 L 、 S_a 和 l_a 。具体步骤如下：

1) 利用 Levenberg-Marquardt^[12]算法计算每一幅原始光场图像的角点 \mathbf{M} 和对应的虚拟像点 m' 之间的单应性矩阵 \mathbf{H} ($\mathbf{H} = \lambda \mathbf{A} [\mathbf{r}_1 \quad \mathbf{r}_2 \quad \mathbf{t}]$, λ 为任意系数) 的最大似然估计值。

2) 令 \mathbf{H} 的第 i 列向量为 $[h_{i1}, h_{i2}, h_{i3}]^T$ ，根据 \mathbf{r}_1 和 \mathbf{r}_2 的正交性及 \mathbf{V}_{ij} 和 \mathbf{V} ，计算 $\mathbf{V}^T \mathbf{V}$ 的最小特征值对应的特征向量 $[B_{11}, B_{12}, B_{22}, B_{13}, B_{23}, B_{33}]$ ，

$$\mathbf{V}_{ij} = [h_{i1}h_{j1}, h_{i1}h_{j2} + h_{i2}h_{j1}, h_{i2}h_{j2}, h_{i3}h_{j1} + h_{i1}h_{j3}, h_{i3}h_{j2} + h_{i2}h_{j3}, h_{i3}h_{j3}]^T, \quad (11)$$

$$\mathbf{V} = \begin{bmatrix} \mathbf{V}_{12}^T \\ (\mathbf{V}_{11} - \mathbf{V}_{22})^T \end{bmatrix}^{\circ} \quad (12)$$

3) 计算出内部参数 \mathbf{A} 和外部参数 $[\mathbf{R} \quad \mathbf{t}]$ 。

$$v_0 = (B_{12}B_{13} - B_{11}B_{23}) / (B_{11}B_{22} - B_{12}^2), \quad (13)$$

$$\lambda = B_{33} - [B_{13}^2 + v_0(B_{12}B_{13} - B_{11}B_{23})] / B_{11}, \quad (14)$$

$$\alpha = \sqrt{\lambda / B_{11}}, \quad (15)$$

$$\beta = \sqrt{\lambda B_{11} / (B_{11}B_{22} - B_{12}^2)}, \quad (16)$$

$$\gamma = -B_{12}\alpha^2\beta / \lambda, \quad (17)$$

$$u_0 = \gamma v_0 / \beta - B_{13}\alpha^2 / \lambda, \quad (18)$$

$$\mathbf{r}_1 = \lambda \mathbf{A}^{-1} \mathbf{h}_1, \quad (19)$$

$$\mathbf{r}_2 = \lambda \mathbf{A}^{-1} \mathbf{h}_2, \quad (20)$$

$$\mathbf{r}_3 = \mathbf{r}_1 \times \mathbf{r}_2, \quad (21)$$

$$\mathbf{t} = \lambda \mathbf{A}^{-1} \mathbf{h}_3. \quad (22)$$

4) 利用 Levenberg-Marquardt 算法最小化目标函数，进一步优化内外参数。

$$\sum_i^n \sum_j^p \|\tilde{\mathbf{m}}_{ij} - \tilde{\mathbf{m}}(\mathbf{A}, k_1, k_2, \mathbf{R}_i, \mathbf{t}_i, \tilde{\mathbf{M}}_j)\|^2, \quad (23)$$

式中 k_1 、 k_2 为主透镜的径向畸变系数^[18]， p 为每一幅原始光场图像中角点数， n 为拍摄的原始光场图像数。 \mathbf{A} 和 $[\mathbf{R} \quad \mathbf{t}]$ 的初始值由步骤 3) 计算得到。 $\tilde{\mathbf{m}}(\mathbf{A}, k_1, k_2, \mathbf{R}_i, \mathbf{t}_i, \tilde{\mathbf{M}}_j)$ 根据(1)式由原始光场图像的第 i 个图像中第 j 个角点 $\tilde{\mathbf{M}}_j$ 计算得到。

5) 为了保证各微透镜覆盖的子图像不互相重叠，且相机成像探测器的像素能够得到最大程度利用，主透镜的像方 F 数和微透镜的像方 F 数相等，

$$D/L = d/l_a, \quad (24)$$

式中 D 、 d 分别为主透镜的光瞳直径和微透镜的光瞳直径。

6) 联立(4)式、(6)式和(24)式可以得到 l_a 、 S_a 、 L ，即

$$l_a = \frac{\alpha dx d\beta'}{D\beta_m - d}, \quad (25)$$

$$S_a = l_a / \beta', \quad (26)$$

$$L = S_a + \alpha dx. \quad (27)$$

3 实验结果及分析

3.1 标定装置

图 3 为聚焦光场相机标定实验装置图。标定板 (14×9 个角点) 和聚焦光场相机 (R29, Raytrix KAI-

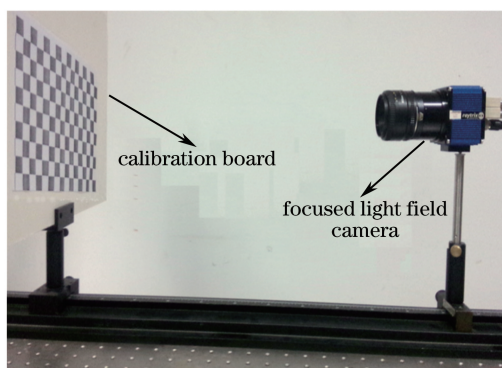


图 3 聚焦光场相机标定实验装置图

Fig. 3 Experimental setup of the focused light field camera

29050) 放置在同一轨道上, 聚焦光场相机的位置固定不变, 标定板的位置和旋转角度可以调节。聚焦光场相机的分辨率是 $6576(H) \times 4384(V)$, 微透镜阵列具有 207×160 个微透镜, 每个像素的尺寸为 $5.5 \mu\text{m} \times 5.5 \mu\text{m}$, 主透镜直径为 14 mm , 微透镜直径为 $165 \mu\text{m}$ 。

由于主透镜等效面在相机中的位置未知, 无法测量标定板深度的实际距离。将两个不同深度位置标定板之间的相对距离 $T=90 \text{ mm}$ 作为评价基准, 计算这一距离的标定误差, 评价该方法对标定板深度的标定精确度。第一组深度位置与相机的距离为 570 mm , 第二组深度位置与相机的距离为 660 mm 。在每个深度

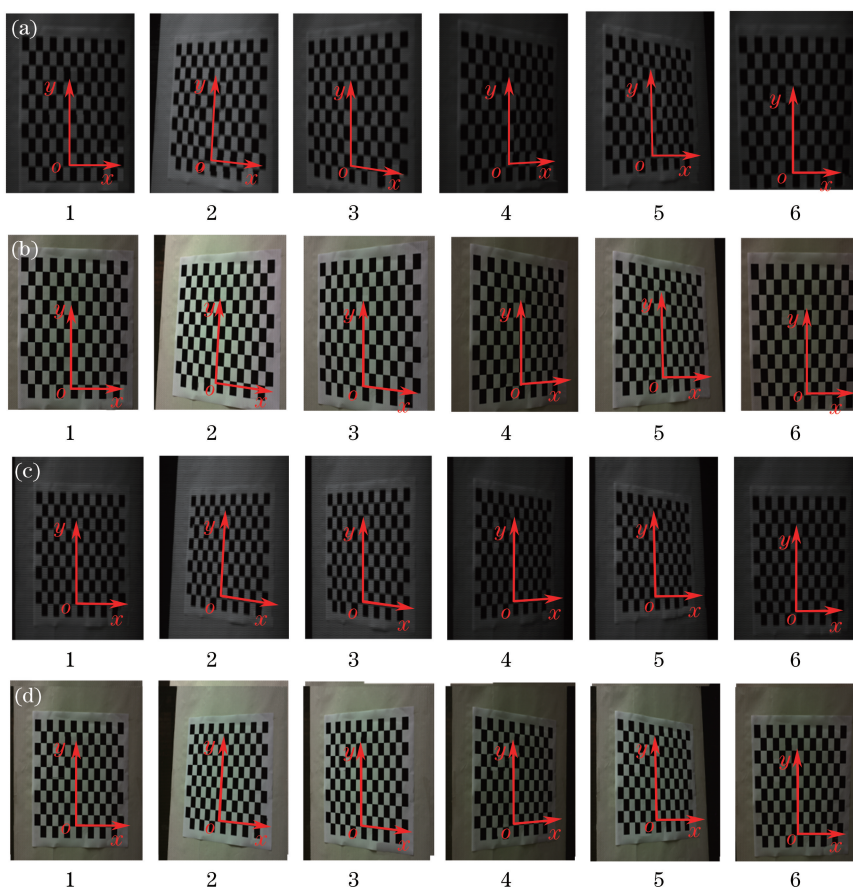


图 4 两组不同深度位置的标定板图像。(a)第一组原始光场图像(570 mm);(b)第一组全聚焦图像;

(c)第二组原始光场图像(660 mm);(d)第二组全聚焦图像

Fig. 4 Images of the calibration board in two depths. (a) The first group of raw light field images (570 mm);

(b) the first group of total focused images; (c) the second group of raw light field images (660 mm);

(d) the second group of total focused images

位置下,拍摄并保存 6 张不同旋转角度的标定板原始光场图像。需要指出的是,通过比较两组不同深度位置各自的标定结果,可以进一步确定不同标定板深度对标定精确度的影响。

为了比较所提基于原始光场图像的标定方法与基于全聚焦图像的标定方法^[17]的精确度,需要使用全聚焦图像。全聚焦图像可看作标定板关于主透镜所成的像,是通过重聚焦算法^[15]从原始光场图像进一步计算得到的,图像上各点为角点关于主透镜共轭的虚拟像点,因而全聚焦图像可直接利用(1)式来标定聚焦光场相机。所使用的原始光场图像及全聚焦图像如图 4 所示,1 号图像对应的标定板的世界坐标系与相机坐标系平行;2 号图像对应的标定板的世界坐标系由相机坐标系绕 x 轴和 y 轴依次逆时针旋转 10° 和顺时针旋转 20° 得到;3 号图像对应的标定板的世界坐标系由相机坐标系绕 y 轴顺时针旋转 20° 得到;4 号图像对应的标定板的世界坐标系由相机坐标系绕 y 轴逆时针旋转 20° 得到;5 号图像对应的标定板的世界坐标系由相机坐标系绕 x 轴和 y 轴依次逆时针旋转 10° 和逆时针旋转 20° 得到;6 号图像对应的标定板的世界坐标系由相机坐标系绕 x 轴顺时针旋转 10° 得到。相同编号的图像对应的标定板具有相同的旋转角度,每一幅图像对应的标定板世界坐标系都以第 1 行(从下而上)第 7 列(从左而右)的角点作为坐标系原点。

3.2 虚拟像点

标定模型(1)式中的虚拟像点 m' 坐标是根据原始光场图像上像点 m [图 5(a)中红色点] 坐标通过(2)式计算得到。为了评价虚拟像点坐标计算的准确性,将求得的虚拟像点坐标与全聚焦图像上的虚拟像点[图 5(b)中红色点]坐标进行比较,以全聚焦图像上的虚拟像点坐标为基准,计算原始光场图像的虚拟像点坐标的计算误差。第一组第一幅原始光场图像虚拟像点 m' 的计算误差结果如图 6(a)所示,误差小于 14 pixel;第二组第一幅原始光场图像虚拟像点的计算误差结果如图 6(b)所示,误差小于 18 pixel。表 1 为两组深度位置每幅(第 1~6 幅)原始光场图像虚拟像点计算误差的平均值、最大值和均方根(RMS)。可见,第一组最大误差小于 21 pixel,第二组最大误差小于 18 pixel。标定板在不同深度位置上,原始光场图像和全聚焦图像虚拟像点计算误差基本一致,说明将标定板置于其中任一深度位置均可利用原始光场图像计算虚拟像点,同时也证明了基于原始光场图像计算虚拟像点方法的可行性。

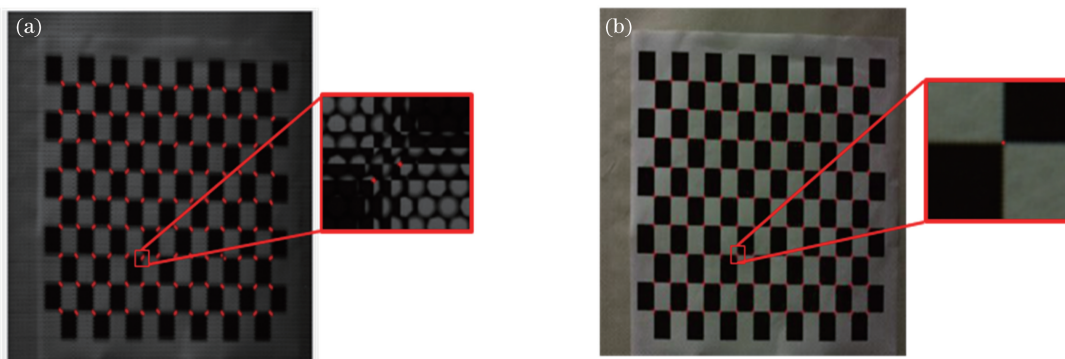


图 5 标定板图像。(a)原始光场图像;(b)全聚焦图像

Fig. 5 Images of the calibration board. (a) Raw light field image; (b) total focused image

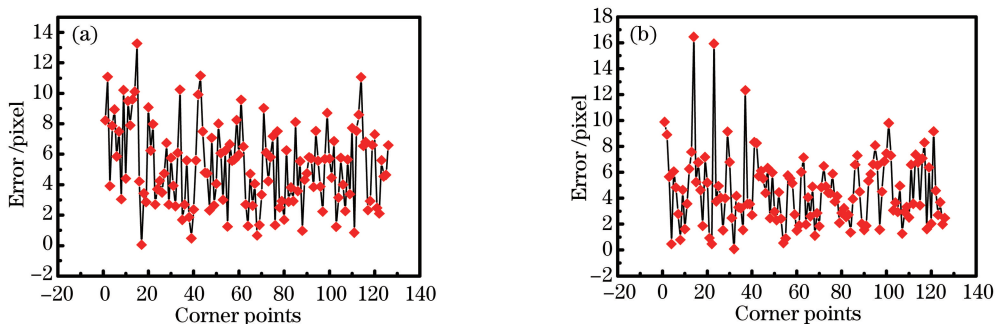


图 6 两组中第一幅图像的虚拟像点的计算误差。(a)第一组;(b)第二组

Fig. 6 Errors of the virtual image points of the first images in two groups. (a) The first group; (b) the second group

表 1 两组图像的虚拟像点的计算误差

Table 1 Calculation errors of the virtual image points of each image in two groups

Group	Image number	Mean error /pixel	Maximum error /pixel	RMS /pixel
First group	1	5.21	13.27	5.87
	2	4.84	13.03	5.48
	3	6.09	20.11	7.03
	4	5.28	17.79	6.42
	5	4.84	19.34	5.66
	6	6.73	14.75	7.48
Second group	1	4.56	16.46	5.35
	2	3.72	17.11	4.41
	3	4.11	11.67	4.65
	4	4.01	15.19	4.78
	5	4.15	17.29	4.91
	6	4.50	10.83	5.06

3.3 角点的标定误差

为了评价标定模型的精确性,计算原始光场图像各角点的标定误差(即标定结果中计算出的角点 M 坐标与实际各角点世界坐标之间的空间物理距离),结果如表 2、3 所示。由表 2 可知,利用第一组原始光场图像得到的标定结果中角点的标定误差小于 23 mm,平均相对误差都小于 3%;由表 3 可知,利用第二组原始光场图像得到的标定结果中角点的标定误差小于 21 mm,平均相对误差都小于 3%。比较不同位置处标定板原始光场图像得到的角点的相对误差发现,改变标定板位置,利用原始光场图像得到的角点的相对误差基本一致,说明将标定板置于其中任一深度位置均可标定聚焦光场相机。

表 2 第一组原始光场图像的标定误差

Table 2 Calibration errors of the first group of raw light field images

Image number	Mean error /mm	Maximum error /mm	RMS /mm	Mean relative error /%
1	0.78	1.82	0.65	0.31
2	6.20	19.12	4.79	2.45
3	6.39	17.38	4.97	2.53
4	6.79	16.21	5.38	2.68
5	7.48	22.56	5.62	2.96
6	4.81	12.18	3.68	1.90

表 3 第二组原始光场图像的标定误差

Table 3 Calibration errors of the second group of raw light field images

Image number	Mean error /mm	Maximum error /mm	RMS /mm	Mean relative error /%
1	0.65	2.31	0.53	0.26
2	5.04	15.54	3.88	1.99
3	5.20	14.12	4.07	2.06
4	5.89	14.54	4.68	2.34
5	6.56	20.32	4.96	2.59
6	4.11	10.49	3.13	1.63

以第 3 幅和第 6 幅原始光场图像为例,分析这两幅图像中每个角点的标定误差的分布情况,结果如图 7 所示(共 14×9 个角点)。图中 x 表示标定板上角点所处的列数, y 表示标定板上角点所处的行数, z 表示标定板角点的标定误差。由图 7(a)可知,在 $x=0$ 的两侧,角点的标定误差随着 x 坐标绝对值的增大而增大;由图 7(b)可知,角点的标定误差随着 y 坐标值的增大而增大。主要原因在于,第 3 幅标定板图像的世界坐标系绕相机坐标系 y 轴旋转了 20° ,第 6 幅标定板图像的世界坐标系绕相机坐标系 x 轴旋转了 10° ,角点离坐标轴越远,离焦程度越大,相应的像点和虚拟像点坐标的误差也越大,从而导致角点的标定误差也越大。

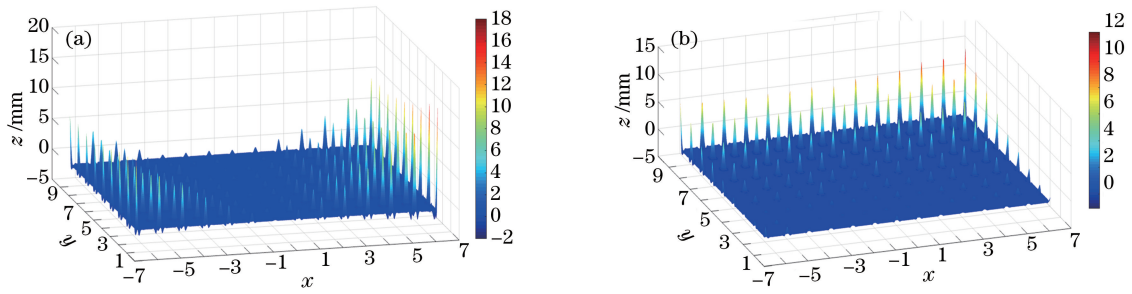


图 7 原始光场图像中角点的标定误差的分布。(a)第 3 幅;(b)第 6 幅

Fig. 7 Distribution of the calibration errors of corner points in raw light field images. (a) The third image; (b) the sixth image

3.4 结构参数

由第一组原始光场图像和全聚焦图像标定得到的聚焦光场相机的结构参数如表 4 所示。表 4 中 S_a 为负值,表明虚拟像点和像点位于微透镜阵列的同一侧,说明该聚焦光场相机属于伽利略结构,如图 1(b)所示。

为了比较利用原始光场图像和全聚焦图像得到的结构参数的差异,以全聚焦图像得到的结构参数为参照基准,计算原始光场图像得到的结构参数相对于全聚焦图像得到的结构参数的相对误差。第一组标定板深度位置处, l_a 、 S_a 和 L 的相对误差分别为 2.04%、2.41%和 2.04%。结果表明,利用原始光场图像和全聚焦图像^[17]得到的结构参数基本一致,说明本文方法与基于全聚焦图像的标定方法具有相似的精确度,因此,可以使用该方法标定聚焦光场相机的结构参数。

表 4 聚焦光场相机的结构参数

Table 4 Configuration parameters of the focused light field camera

Group	l_a /mm	S_a /mm	L /mm
First group of raw light field images	0.59	-2.91	50.50
First group of total focused images	0.61	-2.85	51.56

3.5 外部参数

基于两组原始光场图像和全聚焦图像标定得到的聚焦光场相机的外部参数如表 5、6 所示(实验过程中 t_x 和 t_y 不变,不予列举)。

表 5 基于第一组图像得到的聚焦光场相机的外部参数

Table 5 External parameters of the focused light field camera based on the first group of images

Image number	q_1 /($^\circ$)	q_2 /($^\circ$)	q_3 /($^\circ$)	t_z /mm	
Raw light field images	1	0.69	-2.00	0.72	498.59
	2	-11.44	18.13	4.78	514.15
	3	0.34	18.64	0.27	492.88
	4	0.96	-21.66	1.31	511.27
	5	-11.26	-21.18	-2.31	532.38
	6	10.91	-2.14	0.32	477.32
Total focused images	1	0.67	-1.96	0.72	500.15
	2	-11.33	18.23	4.75	515.59
	3	0.45	18.74	0.23	493.10
	4	0.77	-21.85	1.24	511.36
	5	-11.32	-21.23	-2.24	534.33
	6	11.07	-2.09	0.32	478.03

3.5.1 角度的标定误差

由于无法测量 q_1 、 q_2 和 q_3 的实际角度,以两幅图像(第 1 幅和第 6 幅)所对应标定板绕 x 轴的相对旋转角度 Q (如图 8 所示, $Q=10^\circ$)为基准,根据原始光场图像和全聚焦图像得到的 Q 的标定结果(即表 4 所示第 6 幅图像和第 1 幅图像 q_1 之间的差值),计算 Q 的标定相对误差,结果如图 9 所示。

表 6 基于第二组图像得到的聚焦光场相机的外部参数

Table 6 External parameters of the focused light field camera based on the second group of images

	Image number	$q_1 / (^\circ)$	$q_2 / (^\circ)$	$q_3 / (^\circ)$	t_z / mm
Raw light field images	1	0.69	-1.94	0.76	597.53
	2	-11.35	17.09	4.58	613.71
	3	0.23	18.62	0.36	590.74
	4	0.43	-22.74	1.21	610.03
	5	-11.38	-22.45	-2.59	632.82
	6	11.01	-2.29	0.32	574.64
Total focused images	1	0.69	-1.94	0.77	597.31
	2	-11.46	17.19	4.62	613.29
	3	0.15	18.69	0.39	590.74
	4	0.46	-22.56	1.24	609.67
	5	-11.47	-22.25	-2.56	632.23
	6	11.06	-2.14	0.29	574.47

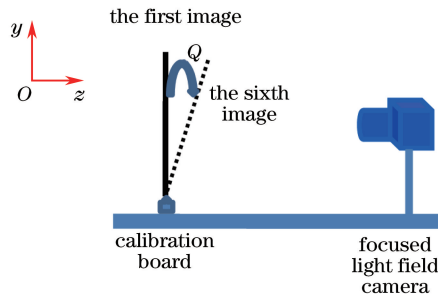


图 8 第 1 幅和第 6 幅图像的标定板相对旋转角度示意图

Fig. 8 Diagram of the rotation angle of the calibration board for the first image and the sixth image

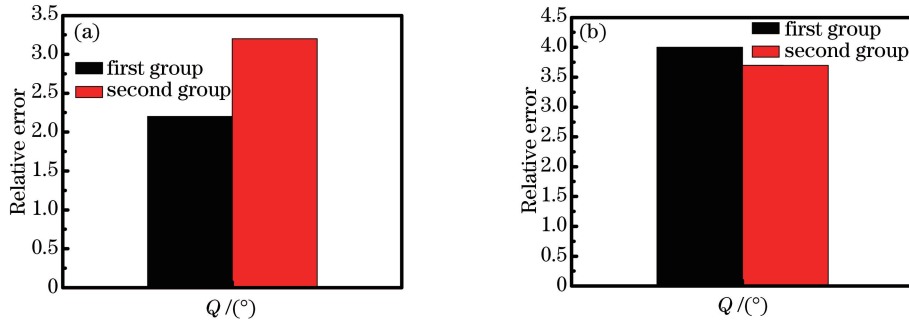


图 9 旋转角度的相对误差。(a)原始光场图像;(b)全聚焦图像

Fig. 9 Relative errors of the rotation angle. (a) Raw light field image; (b) total focused image

由图 9(a)可知,基于第一组和第二组原始光场图像得到的旋转角度 Q 的相对误差分别小于 2.5% 和 3.5%。由图 9(b)可知,基于第一组和第二组全聚焦图像得到的旋转角度 Q 的相对误差都小于 4%。比较基于原始光场图像和全聚焦图像得到的旋转角度 Q 相对误差,发现二者基本一致。

3.5.2 距离的标定误差

根据基于原始光场图像和全聚焦图像得到的标定结果,即与第一组每一幅(1~6)图像(原始光场图像或全聚焦图像)和第二组每一幅(1~6)图像(原始光场图像或全聚焦图像) t_z 之间的差值,计算 T 的标定相对误差,结果如图 10 所示。由图 10(a)可知,通过原始光场图像标定得到的标定板距离的标定相对误差小于 12%,由图 10(b)可知,通过全聚焦图像得到的标定板距离的标定相对误差小于 10%,且每一幅原始光场图像得到的标定板距离的标定相对误差都基本接近。

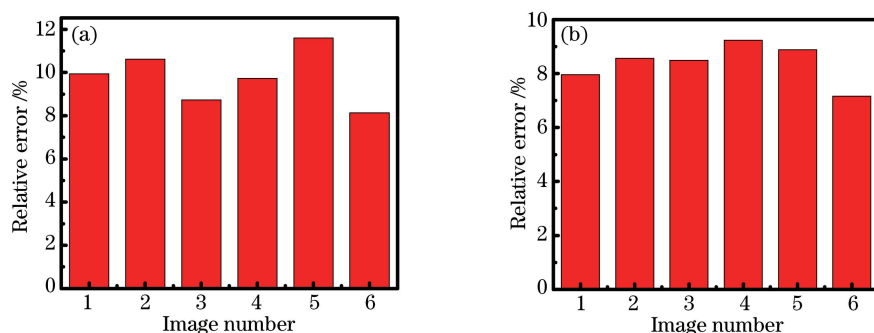


图 10 不同深度标定板之间距离的相对误差。(a)原始光场图像;(b)全聚焦图像

Fig. 10 Relative errors of the distance between two depths of the calibration board.

(a) Raw light field image; (b) total focused image

4 结 论

提出了一种基于原始光场图像的聚焦光场相机的标定方法,拍摄了两组不同深度位置的标定板图像,并根据标定板上角点与其共轭像点关于主透镜的共轭关系,建立了标定模型;利用 Levenberg-Marquardt 算法求解该标定模型,得到聚焦光场相机的几何参数;最后对比了全聚焦图像标定结果,计算并分析了原始光场图像虚拟像点坐标的计算误差、角点空间位置坐标的标定误差、标定板旋转角度的标定误差和标定板距离(深度)的标定误差。实验结果表明,不同深度光场图像虚拟像点的计算误差分别小于 21 pixel 和 18 pixel,对应的标定板角点的标定误差均小于 3%,说明将标定板置于其中任一深度位置均可标定聚焦光场相机。比较了基于原始光场图像和全聚焦图像方法获得的结构及外部参数,发现二者基本一致,说明所提的基于原始光场图像的标定方法具有较高的精度,证明了基于原始光场图像的聚焦光场相机的标定方法的可行性和可靠性。

参 考 文 献

- [1] Feng Huanfei. Research on camera calibration method in three dimensional reconstruction[D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2013: 1-10.
冯焕飞. 三维重建中的相机标定方法研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2013: 1-10.
- [2] Li Yunxiang. Research on camera calibration and 3D reconstruction technology [D]. Qingdao: Qingdao University, 2009: 1-8.
李云翔. 相机标定与三维重建技术研究[D]. 青岛: 青岛大学, 2009: 1-8.
- [3] Zhang Yujin. Image engineering in China and some current research focuses[J]. Journal of Computer Aided Design and Graphics, 2002, 14(6): 490-497.
章毓晋. 中国图像工程及当前的几个研究热点[J]. 计算机辅助设计及图形学报, 2002, 14(6): 490-497.
- [4] Yang Fan, Liu Wei, Zhang Yang, *et al.* Binocular camera calibration method combined with the four collinear constraints[J]. Acta Optica Sinica, 2016, 36(7): 0715001.
杨帆, 刘巍, 张洋, 等. 结合四角共线约束的大视场双目相机标定方法[J]. 光学学报, 2016, 36(7): 0715001.
- [5] Liu Yan, Li Tengfei. Research of the improvement of Zhang's camera calibration method[J]. Optical Technique, 2014, 40(6): 565-570.
刘艳, 李腾飞. 对张正友相机标定法的改进研究[J]. 光学技术, 2014, 40(6): 565-570.
- [6] Zhang Chunping, Wang Qing. Survey on imaging model and calibration of light field camera [J]. Chinese J Lasers, 2016, 43(6): 0609004.
张春萍, 王庆. 光场相机成像模型及参数标定方法综述[J]. 中国激光, 2016, 43(6): 0609004.
- [7] Gershun A. The light filed[J]. Journal of Mathematics and Physics, 1939, 18(1): 51-97.
- [8] Adelson E H, Wang J Y A. Single lens stereo with a plenoptic camera[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis & Machine Intelligence, 1992, 14(2): 99-106.
- [9] Ng R, Levoy M, Bredif M, *et al.* Light field photography with a hand-held plenoptic camera[J]. Computer Science

- Technical Report, 2005, 2(11): 1-11.
- [10] Georgiew T, Lumsdaine A. Focused plenoptic camera and rendering[J]. Journal of Electronic Imaging, 2010, 19(2): 0211061.
- [11] Lumsdaine A, Georgiew T. The focused plenoptic camera[C]. 2009 IEEE International Conference on Computational Photography, San Francisco, America, 2009, 8667(15): 1-8.
- [12] Zhang Z Y. A flexible new technique for camera calibration[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2000, 22(11): 1330-1334.
- [13] Yang Yang, Yang Shuo, Zhou Quan, *et al.* Center calibration and image correction method based on Tsai algorithm [J]. Journal of University of Jinan (Natural Science Edition), 2007, 21: 27-29.
杨 洋, 杨 硕, 周 全, 等. 一种基于 Tsai 算法的中心标定及图像矫正方法[J]. 济南大学学报(自然科学版), 2007, 21: 27-29.
- [14] Bok Y, Jeon H G, Kweon I S. Geometric calibration of micro-lens-based light field cameras using line features[C]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2017, 39(2): 287-300.
- [15] Strobl K H, Lingenauber M. Stepwise calibration of focused plenoptic cameras[J]. Computer Vision and Image Understanding, 2016, 145: 140-147.
- [16] Johannsen O, Heinze C, Goldluecke B, *et al.* On the calibration of focused plenoptic cameras[C]. Time-of-Flight and Depth Imaging, 2013: 302-317.
- [17] Zeller N, Quint F, Stilla U. Depth estimation and camera calibration of a focused plenoptic camera for visual odometry [J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2016, 118: 83-100.
- [18] Liu Zeqing, Zhang Yurong, Zhao Jianxin, *et al.* High speed camera calibration for velocity measurement in range static explosion experiment[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2016, 53(11): 111501.
刘泽庆, 张玉荣, 赵建新, 等. 靶场静爆实验测速高速相机标定方法[J]. 激光与光电子学进展, 2016, 53(11): 111501.