

三目立体相机的标定研究

李孟, 周波, 孟正大, 戴先中

(东南大学复杂工程系统测量与控制教育部重点实验室, 江苏南京 210096;
东南大学自动化学学院, 江苏南京 210096)

摘要: 立体相机标定是计算机视觉中的重要方法, 在立体相机的距离测量、三维重建等领域占据着重要的基础地位和广泛的用途。文中在单目相机标定的基础上提出了三目立体标定的新方法, 其主要原理是利用三个相机之间的约束关系, 建立多目标带约束的优化方程使标定精度得到提高, 三目相机标定相对于传统的单目相机标定还可以得到三个相机之间的位置关系。文中首先讲述了立体相机标定的一些基础知识, 其中主要是相机模型的介绍; 其次讲述了单目摄像机的标定原理, 并由此提出三目摄像标定的方法; 最后给出实验的结果, 验证了所提方法的正确性和有效性。

关键词: 立体相机标定; 计算机视觉; 三维重建; 相机模型

中图分类号: TP301

文献标识码: A

文章编号: 1673-629X(2015)02-0069-05

doi: 10.3969/j.issn.1673-629X.2015.02.016

Study on Trinocular Stereo Camera Calibration

LI Meng, ZHOU Bo, MENG Zheng-da, DAI Xian-zhong

(Ministry of Education Key Laboratory of Measurement and Control of CSE, Southeast University,
Nanjing 210096, China;
School of Automation, Southeast University, Nanjing 210096, China)

Abstract: Stereo camera calibration is an important step in computer vision. It occupies the important status in stereo camera distance measurement, three-dimensional reconstruction and other fields. In this paper, a new method of stereo calibration is proposed on the basis of monocular camera. Its main principle is to use the constraint relationship between the three cameras for constructing multi-objective optimization equation with constraints to improve the calibration precision. It can also get the translation and rotation between three cameras. Firstly, tell some basic knowledge of stereo camera calibration, of which the camera model is introduced mainly. Secondly, discuss the monocular camera calibration principle, and thus the ternary camera calibration method is put forward. Eventually, the results of experiment are given to validate the correctness and effectiveness of the proposed method.

Key words: stereo camera calibration; computer vision; three-dimensional reconstruction; camera model

0 引言

计算机视觉领域的研究目标是使计算机能够通过二维图像感知三维环境, 从而可以进行一些后处理, 比如三维重建以及视觉定位等研究。在计算机视觉领域, 进行视觉测量等研究必不可少的一步是摄像机的标定, 立体相机标定的主要任务是获得摄像机的内外参数信息, 同时得到多个相机之间的位置关系^[1]。摄像机标定精度直接影响着视觉测量系统的性能。国内外许多学者对标定技术都进行了深入的研究, 也取得

了一定的成果, 但到目前为止没有一种标定方法能满足所有的标定需求, 它们都有着各自的优缺点, 在实际的应用中要根据情况选择适当的标定方法^[2-3], 针对具体应用, 先对各个相机单独标定, 再利用各个相机存在的约束关系全局标定, 从而提高相机标定的精度。

1 摄像机模型

1.1 摄像机中常见坐标

在摄像机标定中, 首先要搞清楚图像像素坐标系、

收稿日期: 2014-03-25

修回日期: 2014-06-29

网络出版时间: 2014-12-27

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61005092)

作者简介: 李孟(1990-), 男, 硕士研究生, 研究方向为移动机器人; 周波, 博士, 副教授, 研究方向为工业机器人、移动机器人等; 孟正大, 教授, 硕士生导师, 研究方向为机器人运动控制、机器人智能控制等; 戴先中, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为机器人控制、神经网络软测量与控制等。

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1450.TP.20141227.1348.049.html>

图像物理坐标系、摄像机坐标系、世界坐标系的位置关系,这几个坐标系的位置关系的理解是研究摄像机模型的前提。

在图 1 中,首先在图像上建立坐标系 uOv , 图像上每点的坐标 (u, v) 代表图像上每个像素点的列数和行数, 因为 (u, v) 所对应的值是图像在该点的灰度值, 因此 (u, v) 被称之为像素坐标, 而其中 (u_0, v_0) 是图像的中心点的像素坐标。

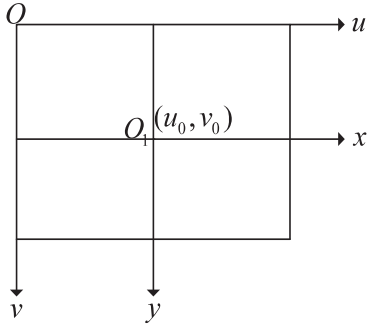


图 1 图像像素坐标系与图像物理坐标系

同时为了将图像的像素坐标与实际物理尺寸联系起来, 还需要建立图像物理坐标系 xO_1y , 点 O_1 为图像像素坐标系的中心, 每个像素沿 x 轴方向的实际物理尺寸为 dx , 沿 y 轴方向的实际物理尺寸为 dy , 则能够得到两个坐标系的变换关系:

$$u = \frac{x}{dx} + u_0 \tag{1}$$

$$v = \frac{y}{dy} + v_0 \tag{2}$$

上式写成齐次坐标的形式:

$$\begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{dx} & 0 & u_0 \\ 0 & \frac{1}{dy} & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix} \tag{3}$$

图 2 中, $O_c - X_c Y_c Z_c$ 代表着摄像机坐标系, 其中, O_c 是摄像机的光心, X_c 和 Y_c 分别和图像坐标系的 x 轴和 y 轴是平行的。世界坐标系的选择一般是根据实际情况进行合理的选择, 图中 $O_w - X_w Y_w Z_w$ 代表着世界坐标系。世界坐标系与相机坐标系的变换关系如下:

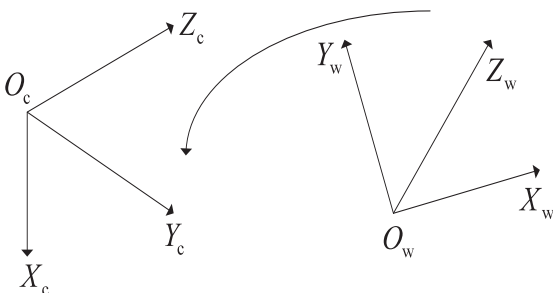


图 2 相机坐标系与世界坐标系的关系

$$\begin{bmatrix} X_c \\ Y_c \\ Z_c \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{R} & \mathbf{t} \\ \mathbf{0} & \mathbf{1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \\ 1 \end{bmatrix} \tag{4}$$

其中, 向量 \mathbf{t} 代表世界坐标系的原点在相机坐标系中的坐标值; \mathbf{R} 代表世界坐标系到相机坐标系的旋转矩阵, 其可以用欧拉角进行表达, 其中 α 表示绕 Z_w 轴旋转角度, β 表示绕 Y_w 旋转角度, γ 表示绕 X_w 旋转角度。

欧拉角表达旋转矩阵形式如下:

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} \cos\alpha\cos\beta & \cos\alpha\sin\beta\gamma - \sin\alpha\gamma & \cos\alpha\sin\beta\gamma + \sin\alpha\gamma \\ \sin\alpha\cos\beta & \sin\alpha\sin\beta\gamma + \cos\alpha\gamma & \sin\alpha\sin\beta\gamma - \cos\alpha\gamma \\ -\sin\beta & \cos\beta\sin\gamma & \cos\beta\gamma \end{bmatrix} \tag{5}$$

1.2 相机投影模型

相机的投影模型中, 光线从场景或者很远的地方发射过来, 所有的光线穿过图像平面最后相交于一点即投影中心。如图 3 所示, f 表示图像平面与投影中心之间的距离, 也即焦距, 光轴与图像平面的交点为主点^[4-5], 坐标为 (c_x, c_y) , 由相似三角形的关系可以得到:

$$\mathbf{q} = \mathbf{M}\mathbf{Q} \tag{6}$$

其中, $\mathbf{M} = \begin{bmatrix} f_x & 0 & c_x \\ 0 & f_y & c_y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$ 。

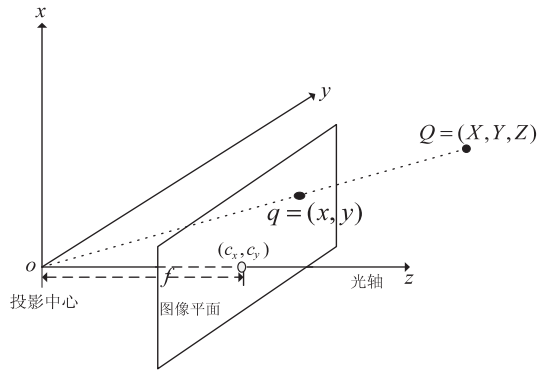


图 3 相机投影模型

然而在相机标定过程中, 并不容易得到真实的物理场景中的点在摄像坐标系下的坐标, 但容易得到点在指定的世界坐标系下的坐标^[6-7], 因此式(6)变成:

$$\tilde{\mathbf{q}} = s\mathbf{M}\mathbf{W}\tilde{\mathbf{Q}} \tag{7}$$

其中, $\tilde{\mathbf{q}} = (x, y, 1)$, 一般选择 $Z=0$, 这样 $\tilde{\mathbf{Q}} = (X, Y, 1)$, s 为任意尺度比例, $\mathbf{W} = [r_1 \ r_2 \ t]$, 定义 $\mathbf{H} = [h_1 \ h_2 \ h_3] = s\mathbf{M}[r_1 \ r_2 \ t]$ 。

2 单目摄像机的标定

由 r_1 和 r_2 的正交性可以得到下面两个约束条件:

$$\mathbf{h}_1^T \mathbf{M}^{-T} \mathbf{M}^{-1} \mathbf{h}_2 = 0 \quad (8)$$

$$\mathbf{h}_1^T \mathbf{M}^{-T} \mathbf{M}^{-1} \mathbf{h}_1 = \mathbf{h}_2^T \mathbf{M}^{-T} \mathbf{M}^{-1} \mathbf{h}_2 \quad (9)$$

同时定义

$$\mathbf{B} = \mathbf{M}^{-T} \mathbf{M}^{-1} = \begin{bmatrix} B_{11} & B_{12} & B_{13} \\ B_{21} & B_{22} & B_{23} \\ B_{31} & B_{32} & B_{33} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{f_x^2} & 0 & \frac{-c_x}{f_x^2} \\ 0 & \frac{1}{f_y^2} & \frac{-c_y}{f_y^2} \\ \frac{-c_x}{f_x^2} & \frac{-c_y}{f_y^2} & \frac{c_x^2}{f_x^2} + \frac{c_y^2}{f_y^2} + 1 \end{bmatrix} \quad (10)$$

$$\mathbf{b} = [B_{11} \ B_{12} \ B_{22} \ B_{13} \ B_{23} \ B_{33}] \quad (11)$$

通过上面的定义可以得到:

$$\mathbf{h}_i^T \mathbf{B} \mathbf{h}_j = \mathbf{v}_{ij}^T \mathbf{b} \quad (12)$$

其中对 \mathbf{h}_i 和 \mathbf{v}_{ij} 的定义如下:

$$\mathbf{h}_i = [h_{i1} \ h_{i2} \ h_{i3}]^T \quad (13)$$

$$\mathbf{v}_{ij} = [h_{i1}h_{j1}, h_{i1}h_{j2} + h_{i2}h_{j1}, h_{i2}h_{j2}, h_{i3}h_{j1} + h_{i1}h_{j3}, h_{i3}h_{j2} + h_{i2}h_{j3}, h_{i3}h_{j3}]^T \quad (14)$$

根据(8)和(9)两个约束条件,可以得到下面等式:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{v}_{12}^T \\ (\mathbf{v}_{11} - \mathbf{v}_{12})^T \end{bmatrix} \mathbf{b} = 0 \quad (15)$$

如果可以同时得到 K 个棋盘图像,堆叠这些方程,有:

$$\mathbf{V} \mathbf{b} = 0 \quad (16)$$

其中, \mathbf{V} 是 $2K \times 6$ 的矩阵,当 $K \geq 3$ 时,可得到唯一解 \mathbf{b} ,从而得到相机的内参数 $(f_x, f_y, c_x, c_y)^{[8-9]}$,当得到相机的内参数矩阵之后,相机的外参数根据单应性条件可以得到:

$$\mathbf{r}_1 = \lambda \mathbf{M}^{-1} \mathbf{h}_1 \quad (17)$$

$$\mathbf{r}_2 = \lambda \mathbf{M}^{-1} \mathbf{h}_2 \quad (18)$$

$$\mathbf{r}_3 = \mathbf{r}_1 \times \mathbf{r}_2 \quad (19)$$

$$\mathbf{t} = \lambda \mathbf{M}^{-1} \mathbf{h}_3 \quad (20)$$

其中, $\lambda = 1 / \|\mathbf{M}^{-1} \mathbf{h}_1\|$ 。

在前面的讨论中,并没有讨论畸变参数的影响,而在实际的相机模型中必须要考虑相机的畸变问题。针对文中的相机,其主要畸变影响是径向畸变^[10-11],其他详细的相机模型可以参考文献[12],畸变的示意图如图4所示。

从图中可以看出在远离图像中心,尤其是图像的边缘畸变严重,也就是说在图像的中心畸变为零,随着向边缘移动,畸变越来越严重。

设 (\tilde{x}, \tilde{y}) 是不考虑畸变的图像坐标系下的坐标,

(\tilde{x}, \tilde{y}) 是真实的也就是畸变之后的图像坐标系下的坐标,并且 (x, y) 和 (\tilde{x}, \tilde{y}) 都是经过正规化之后的,两者的对应关系满足:

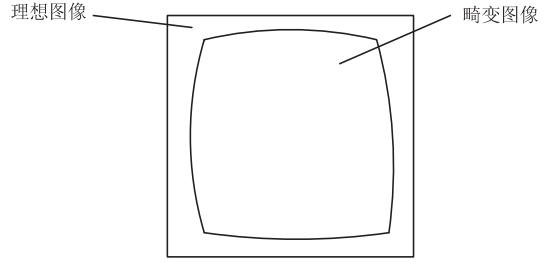


图4 畸变模型

$$\tilde{x} = x + x(k_1(x^2 + y^2) + k_2(x^2 + y^2)^2) \quad (21)$$

$$\tilde{y} = y + y(k_1(x^2 + y^2) + k_2(x^2 + y^2)^2) \quad (22)$$

其中, k_1 和 k_2 是径向畸变系数。

假设 (u, v) 和 (\tilde{u}, \tilde{v}) 分别是不考虑畸变和考虑畸变之后的图像像素坐标系下的坐标值,因此上面两个等式等价于:

$$\tilde{u} = u + (u - u_0)(k_1(x^2 + y^2) + k_2(x^2 + y^2)^2) \quad (23)$$

$$\tilde{v} = v + (v - v_0)(k_1(x^2 + y^2) + k_2(x^2 + y^2)^2) \quad (24)$$

其中, (u_0, v_0) 是光轴与图像平面的交点,也即图像平面的主点。可以在先不考虑畸变的情况下求得相机的内参数,以及各个点的像素坐标,然后再考虑畸变参数。这样的求解思路能带来很大的便利性。对等式(23)和(24)进行整理可得:

$$\begin{bmatrix} (u - u_0)(x^2 + y^2) & (u - u_0)(x^2 + y^2)^2 \\ (v - v_0)(x^2 + y^2) & (v - v_0)(x^2 + y^2)^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} k_1 \\ k_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \tilde{u} - u \\ \tilde{v} - v \end{bmatrix} \quad (25)$$

如果有 n 幅棋盘图,每幅棋盘图有 m 个点,则可以得到 $2 \times m \times n$ 个等式,这 $2 \times m \times n$ 个等式可以形成一个矩阵等式:

$$\mathbf{D} \mathbf{k} = \mathbf{d} \quad (26)$$

通过伪逆求解这个方程,可以得到 $\mathbf{k} = (\mathbf{D}^T \mathbf{D})^{-1} \mathbf{D}^T \mathbf{d}$,这样考虑到畸变参数之后把世界坐标系中的点反投影到图像像素坐标系下,然后对下式进行优化处理,可以得到更为精确的内外参数,对这个式子的最优化求解可以采用 LM 算法进行迭代求取最小值^[13-14]。

$$\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \|u_{ij} - \hat{f}(\mathbf{M}, \mathbf{R}_i, \mathbf{t}_i, k_1, k_2, U_{ij})\|^2 \quad (27)$$

3 三目相机位置关系的求解

三目相机标定与前面的单目相机标定的主要区别在于三目相机标定除了标定摄像机的内外参数之外,还需要各个相机之间的相对位置关系。假设相机的坐标系用 C_k, C_p 表示,其中 $k, p=1, 2, 3, 1, 2, 3$ 分别表示左、中、右相机,则相机的位置关系可以用下式表达:

$$C_k = R_{ckp} C_p + t_{ckp} \quad (28)$$

其中, R_{ckp} 表示 p 相机到 k 相机的旋转变换; t_{ckp} 表示 p 相机到 k 相机的平移变换。

在单目相机标定过程中可以得到相机相对于同一个世界坐标系的位置变换 R_k 和 t_k , 则相机之间的位置变换可以通过下列变换得到:

$$R_{ckp} = R_p R_k^{-1} \quad (29)$$

$$t_{ckp} = t_p - R_p R_k^{-1} t_k \quad (30)$$

这样对于 n 幅棋盘图就可以得到 n 个 R_{ckp} 和 t_{ckp} , 由于噪声和计算误差的影响这些值并不会完全相同, 选择中值作为 R_{ckp} 和 t_{ckp} 的初始值, 然后运用 LM 对计算结果进行优化以得到最优结果。优化方程建立如下:

$$(R_{ckp}, t_{ckp}) = \min J \quad (31)$$

定义:

$$J = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \| u_{kij} - \tilde{f}(M_k, R_{pi}, t_{pi}, k_{k1}, k_{k2}, R_{ckp}, t_{ckp}, U_{ij}) \|^2 \quad (32)$$

上述优化过程并没有考虑三个相机之间的约束关系 $g(R_{c12}, t_{c12}, R_{c23}, t_{c23}, R_{c13}, t_{c13}) = 0$, 而只是对每个相机进行单独的优化与处理, 考虑到约束条件可以起到优化参数的作用, 进而提高相机位置之间的标定精度。重新整理之后的优化方程如下:

$$J_1 = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \| u_{1ij} - \tilde{f}(M_1, R_{2i}, t_{2i}, k_{11}, k_{12}, R_{c12}, t_{c12}, U_{ij}) \|^2 \quad (33)$$

$$J_2 = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \| u_{2ij} - \tilde{f}(M_2, R_{3i}, t_{3i}, k_{21}, k_{22}, R_{c23}, t_{c23}, U_{ij}) \|^2 \quad (34)$$

$$J_3 = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \| u_{1ij} - \tilde{f}(M_1, R_{3i}, t_{3i}, k_{11}, k_{12}, R_{c12}, R_{c23}, R_{c13} t_{c23} + t_{c12}, U_{ij}) \|^2 \quad (35)$$

优化目标为: $\min J$, 其中 $J = J_1 + J_2 + J_3$ 。

4 实验结果

实验的传感器采用 bumblebeeXB3 立体摄像机, 相机资料所焦距标称值为 $f_0 = 2.5$ mm, 相机分辨率为 $384(h) \times 512(v)$, $3.75 \mu\text{m}$ 方形像元, 左边相机与中间相机基线距离为 120 mm, 中间相机与右边相机的基线距离为 120 mm, 左右相机的基线距离为 240 mm。实

验所采用的标定板如图 5 所示, 实验共采集了标定板在 17 个不同姿态下的图像, 每幅图像有 117 个角点坐标。

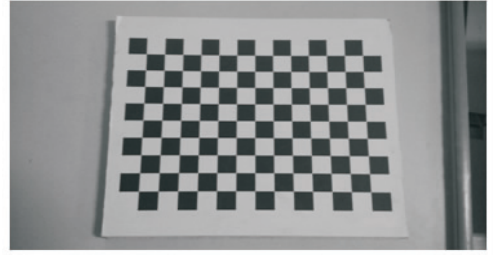


图 5 标定板示意图

左侧相机标定结果:

$$f_{Lx} = 648.2526, f_{Ly} = 646.6535, c_{Lx} = 258.0675, \\ c_{Ly} = 205.3507, k_{L1} = -0.0274, k_{L2} = 0.2503$$

中间相机标定结果:

$$f_{Mx} = 651.6062, f_{My} = 649.8470, c_{Mx} = 261.2572, \\ c_{My} = 206.5159, k_{M1} = -0.0638, k_{M2} = 0.8446$$

右侧相机标定结果:

$$f_{Rx} = 647.5303, f_{Ry} = 645.8162, c_{Rx} = 265.4281, \\ c_{Ry} = 197.0766, k_{R1} = -0.0072, k_{R2} = 0.0555$$

中间相机到左侧相机的变换:

$$R_{c12} = \begin{bmatrix} 1.0000 & -0.0024 & -0.0083 \\ 0.0024 & 1.0000 & 0.0073 \\ 0.0083 & -0.0074 & 0.9999 \end{bmatrix}$$

$$T_{c12} = \begin{bmatrix} -124.10 \\ 1.57 \\ 0.21 \end{bmatrix}$$

右侧相机到中间相机的变换:

$$R_{c23} = \begin{bmatrix} 0.9999 & 0.0035 & -0.0125 \\ -0.0035 & 1.0000 & -0.0030 \\ 0.0125 & -0.0029 & 0.9999 \end{bmatrix}$$

$$T_{c23} = \begin{bmatrix} -122.50 \\ 1.78 \\ 0.25 \end{bmatrix}$$

右侧相机到左侧相机的变换:

$$R_{c13} = \begin{bmatrix} 0.9998 & 0.0012 & -0.0208 \\ -0.0010 & 0.9999 & 0.0103 \\ 0.0208 & 0.0103 & 0.9997 \end{bmatrix}$$

$$T_{c13} = \begin{bmatrix} -246.80 \\ 2.50 \\ 1.10 \end{bmatrix}$$

标定的结果分析:

焦距是摄像机标定中一个非常重要的参数, 首先考察焦距的标定误差。相机 CCD 像元的尺寸为 $dx = dy = 3.75 \mu\text{m}$, 再对 f_x 和 f_y 取平均换算成以 mm 为单位。

$$\hat{f} = \frac{f_x \cdot dx + f_y \cdot dy}{2} \times 10^{-3} \quad (36)$$

则标定结果中焦距绝对误差和相对误差为:

$$\Delta f = f - f_0 \quad (37)$$

$$\delta = \frac{|\Delta f|}{f_0} \times 100\% \quad (38)$$

计算结果如表1所示。

表1 标定误差结果分析

| 摄像机序号 | 绝对误差/mm | 相对误差/% |
|-------|---------|--------|
| 1(左) | -0.07 | 2.8 |
| 2(中) | -0.06 | 2.4 |
| 3(右) | -0.07 | 2.8 |

5 结束语

文中对三目立体标定的方法以及原理进行了详细的研究,提出的多目标带约束的优化方程吻合三目摄像机的参数模型,在此基础上利用 MATLAB 对三目标定原理进行了实验。实验结果很好地验证了三目立体标定原理的正确性以及有效性。

参考文献:

[1] 马颂德,张正友. 计算机视觉:计算理论与算法基础[M]. 北京:科学出版社,1998.
 [2] 徐德,谭民,李原. 机器人视觉测量与控制[M]. 北京:国防工业出版社,2008.
 [3] 吴文琪,孙增圻. 机器视觉中的摄像机定标方法综述[J].

计算机应用研究,2004,21(2):4-6.
 [4] 秦丽娟,胡玉兰,魏英姿,等. 基于模型的单目视觉定位方法研究概述[J]. 仪器仪表学报,2008,29(8):530-533.
 [5] Hallert B. Notes on calibration of cameras and photographs in photogrammetry[J]. Photogrammetria, 1968, 8663(23):163-178.
 [6] Weng J, Cohen P, Herniou M. Camera calibration with distortion models and accuracy evaluation[J]. IEEE Trans on PAMI, 1992, 14(10):965-980.
 [7] Zhang Zhengyou. A flexible new technique for camera calibration[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2000, 22(11):1330-1334.
 [8] 吴福朝,于洪川,袁波,等. 摄像机内参数自标定—理论与算法[J]. 自动化学报,1999,25(6):769-775.
 [9] 袁野,欧宗瑛. 一种考虑二阶径向畸变的主动视觉自标定算法[J]. 中国图象图形学报,2003,8A(3):347-351.
 [10] Hsien C H, Chen F C. General two-stage Kalman filters[J]. IEEE Trans on Automatic Control, 2000, 45(4):819-824.
 [11] Zhang Zhengyou. Flexible camera calibration by viewing plane from unknown orientations[C]//Proc of 7th IEEE international conference on computer vision. Kerkyra; IEEE, 1999:666-673.
 [12] 黄桂平,李小勇,钦桂勤. 数码相机内参数的实验场法标定[J]. 测绘学院学报,2005,22(3):163-165.
 [13] 王保丰,唐歌实,李广云,等. 一种月球车视觉系统的匹配算法[J]. 航空学报,2008,29(1):117-122.
 [14] 黄翔宇,崔平远,崔祐涛. 深空自主导航系统的可观性分析[J]. 宇航学报,2006,27(3):332-337.

(上接第68页)

[4] Jalil K A, Ahmad Z, Manan J A. Securing routing table update in AODV routing protocol [C]//Proc of 2011 IEEE conference on open systems. [s. l.]:IEEE, 2011:116-121.
 [5] 何昆鹏,李腊元. Ad Hoc 网络中按需路由协议的仿真与性能分析[J]. 计算机技术与发展,2008,18(3):81-84.
 [6] Shafiq Z, Mahmud S A, Khan G M, et al. Zone routing protocol: how does it perform the other way round? [C]//Proc of 2012 international conference on ICT convergence. [s. l.]: IEEE, 2012:71-77.
 [7] 徐浩,慕德俊,李立欣. 一种 Ad hoc 网络按需式分簇路由算法[J]. 计算机工程与应用,2007,43(14):3-6.
 [8] Zhang Junna, Yuan Peiyan, Liu Ping. Research and simulations of cluster routing protocols in Ad Hoc networks [C]//Proc of WRI world congress on software engineering. Xiamen: IEEE, 2009:509-512.
 [9] 陈林星,曾曦. 移动 Ad Hoc 网络:自组织分组无线网络

技术[M]. 北京:电子工业出版社,2006.
 [10] 李世宝,洪利. 基于距离预测的移动自组网路由发现算法[J]. 通信学报,2010(11):180-187.
 [11] Pham N D, Choo H. Energy efficient expanding ring search for route discovery in MANETs [C]//Proc of IEEE international conference on communications. Beijing: IEEE, 2008:3002-3006.
 [12] 李士宁,张琪,于超. 基于 Ad Hoc 网络路由协议的控制开销研究[J]. 微电子学与计算机,2007,24(7):108-111.
 [13] 魏焯嘉,王汝传,李伟伟,等. 基于普适计算环境的三维空间 RSSI 位置感知研究[J]. 计算机技术与发展,2010,20(4):183-186.
 [14] Xue Wang, Zhong Songshu, Li Meng. Design of personnel position system of mine based on the average of RSSI [C]//Proc of 2012 IEEE international conference on automation and logistics. Zhengzhou: IEEE, 2012:239-242.

三目立体相机的标定研究

作者: [李孟](#), [周波](#), [孟正大](#), [戴先中](#), [LI Meng](#), [ZHOU Bo](#), [MENG Zheng-da](#), [DAI Xian-zhong](#)

作者单位: [东南大学 复杂工程系统测量与控制教育部重点实验室](#), [江苏 南京 210096](#); [东南大学 自动化学院](#), [江苏 南京 210096](#)

刊名: [计算机技术与发展](#) 

英文刊名: [Computer Technology and Development](#)

年, 卷(期): 2015(2)

引用本文格式: [李孟](#). [周波](#). [孟正大](#). [戴先中](#). [LI Meng](#). [ZHOU Bo](#). [MENG Zheng-da](#). [DAI Xian-zhong](#) [三目立体相机的标定研究](#)[期刊论文]-[计算机技术与发展](#) 2015(2)