

折反射全向相机镜面位姿的自标定方法

项志宇^{1,2} 孙波^{1,2}

(¹ 浙江大学信息与通信工程研究所, 浙江 杭州 310027)
(² 浙江省综合信息技术重点实验室, 浙江 杭州 310027)

摘要 在已知镜面和透视相机参数的情况下, 提出一种不需要任何其他标定物的折反射全向相机镜面位姿的自标定算法, 只需要折反射相机采集任意一幅图像即可估计出反射镜面与透视相机之间的旋转和平移。利用镜面外边缘所成的像, 通过平面圆位姿估算方法获得两个候选位姿; 再利用透视相机镜头边缘的成像, 同时进行镜头边缘参数估计和镜面位姿选择。该标定方法操作简单, 精度高, 适用于非单视点相机的标定。仿真和真图实验结果证明了该方法的有效性。

关键词 机器视觉; 相机标定; 镜面位姿; 折反射相机

中图分类号 TP391 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201232.0415001

Mirror Pose Self-Calibration Method for Catadioptric Camera System

Xiang Zhiyu^{1,2} Sun Bo^{1,2}

¹ Institute of Information and Communication Engineering, Zhejiang University,
Hangzhou, Zhejiang 310027, China

² Zhejiang Provincial Key Laboratory of Information Network Technology, Hangzhou, Zhejiang 310027, China

Abstract Given the parameters of the mirror shape and the camera, a self-calibration method for catadioptric camera system is proposed to estimate the mirror pose with respect to the camera by using only one image containing no special designed calibration pattern. The ellipse corresponding to the mirror boundary in the image is used to compute possible mirror pose by planar circular posture estimation. With two pose candidates thereafter, the correct pose and the parameter of lens boundary simultaneously is found by matching the predicted and the observed image of lens boundary. The method features easy-operating, high accuracy and is suitable for non-single viewpoint system. Experimental results both on synthesized and real images demonstrate the validity of our method.

Key words machine vision; camera calibration; mirror pose; catadioptric camera

OCIS codes 150.1488; 080.4228

1 引 言

具有大视场成像特性的全向相机越来越多的应用到了视频监控、机器人导航、视频会议和场景重建中^[1]。目前使用的全向相机大多是由传统透视相机和反射相机组成的折反射相机。根据是否满足单视点特性, 可将其分为单视点折反射相机和非单视点折反射相机^[1]。决定全向相机特性的参数主要有: 镜

面参数、透视相机参数以及镜面和透视相机之间的位姿参数。由于标定是诸多应用中最基本的一步, 研究人员提出了多种标定折反射相机系统的方法。

近年来多数折反射相机的标定方法主要针对单视点折反射相机。Micusik 等^[2]提出了一种基于两幅图像之间的对极关系来标定单视点抛物镜面折反射相机的自标定方法。Ying 等^[3]提出了基于直线

收稿日期: 2011-09-26; **收到修改稿日期**: 2011-10-25

基金项目: 国家自然科学基金(61071219)和浙江省科技计划(2009C33118)资助课题。

作者简介: 孙波(1987—), 女, 硕士研究生, 主要从事计算机视觉方面的研究。E-mail: sunbo51@gmail.com

导师简介: 项志宇(1973—), 男, 副教授, 硕士生导师, 主要从事计算机视觉方面的研究。

E-mail: xiangzy73@yahoo.com.cn

和球体的几何不变量,在镜面参数已知的前提下估计相机的内部参数(内参)的方法。Zhang 等^[4]利用平行线在全景图像上的性质,提出了一种新的共点线标定模板,将共点线约束引入到曲线拟合的过程中,同时估计出相机的内参和镜面参数。虽然这些方法都非常有效,但他们不能应用于非单视点折反射相机。而当系统的安装误差不能忽略时,单视点相机的特性不再保持,相机就演变为实际上的非单视点相机。

针对非单视点折反射相机的标定方法^[5]主要有以下几种。Fabrizio 等^[6]利用镜面的外边缘和专门设计的镜面底部边缘作为标定物,从镜面的边界图像上恢复出透视相机内参和镜面位姿参数。但专门设计的镜面底部边缘占用了部分镜面反射区域。Mashita 等^[7]利用镜面边缘以及多条无穷远直线的像来估计镜面位姿关系。这种方法仅适合于镜面中心轴与透视相机光轴不重合、误差较小的情况,并且还需要准备由多条直线构成的标定模板。Morel 等^[8]利用偏振图像来标定镜面参数,这种方法需要拍摄三幅不同的偏振图像。Stelow 等^[9,10]利用标定模板,并采用直接非线性优化的方法对折反相机标定,但该算法的精度主要取决于非线性优化初值的好坏。

针对现有标定方法的不足,本文提出一种非单视点折反射全向相机镜面位姿的单图自标定方法。该算法首先利用图像中镜面边缘拟合的椭圆计算两个候选位姿;然后提出了一种利用镜头边缘成像的同时镜头边缘参数估计和镜面位姿选择法。

2 系统模型

2.1 单视点折反射相机系统

如图 1 所示,典型的单视点折反射相机系统是由双曲反射镜面和透视相机组成的。 $O_M-X_M Y_M Z_M$ 和 $O_C-X_C Y_C Z_C$ 分别表示的是镜面坐标系和相机坐标系。在镜面坐标系下,有

$$\frac{Z_M^2}{a_m^2} - \frac{X_M^2 + Y_M^2}{b_m^2} = 1, \quad (1)$$

$$c_m = \sqrt{a_m^2 + b_m^2}. \quad (2)$$

(1) 式表示的双曲镜面有两个焦点 $(0,0,c_m)$ 和 $(0,0,-c_m)$, a_m 和 b_m 表示双曲线的长短轴。 \mathbf{n} 为包含镜面边缘平面的单位法向量, C 为镜面边缘的中心。如果双曲镜面的对称轴与透视相机的光轴完全重合,则在相机坐标系下, $\mathbf{n} = (0,0,1)^T$, $C = (0,0,z_0)^T$, $z_0 = dh + c_m$,其中 dh 表示 C 和 O_M 之间的距离。

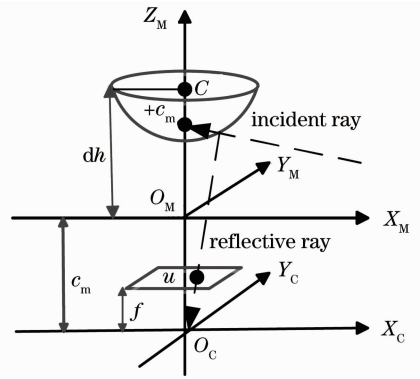


图 1 单视点折反射相机系统

Fig. 1 Single viewpoint catadioptric camera system

2.2 问题阐述

如果反射镜面中心轴与透视相机光轴没有完全重合,此时的折反射相机系统就成为了非单视点折反射相机,其不再具有单视点特性^[11]。非单视点折反射系统的整个模型参数包括镜面参数、透视相机内参和镜面和透视相机之间的相对位姿参数。在实际应用中,折反射全向相机的镜面参数一般已知而且加工精度较高,误差很小可以忽略。透视相机参数也可以通过成熟的相机标定方法事先获得。而镜面和透视相机之间的位姿参数,受安装精度的限制很难得到保证,因此需要对该参数进行标定。

3 标定算法

图 2 为整个标定算法的流程示意图。其步骤如下所述:1) 获取一幅全向图像:利用折反射全向相机拍摄一幅图像,确保图像中反射镜面边缘成像清晰;2) Canny 检测和椭圆拟合:利用 Canny 算子,分别检测出图像中反射镜面边缘和相机镜头边缘的成像边界,利用这两组椭圆成像边界像素点构成的点集,

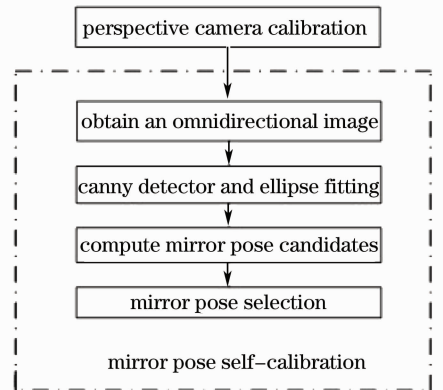


图 2 标定算法流程图

Fig. 2 Flow chart of calibration algorithm

分别拟合出两个椭圆的方程；3) 镜面位姿候选解计算：根据反射镜面边缘成像的椭圆方程和已知的镜面以及透视相机参数，估计反射镜面与透视相机之间的两组候选位姿参数；4) 镜面位姿的选择：根据每组镜面位姿，分别生成镜头边缘的预测成像，并和实际的镜头边缘成像比较，匹配最佳的那组位姿即为正确解。

3.1 传统透视相机模型

$\mathbf{X}_c = (X_c, Y_c, Z_c)^T$ 为相机坐标系下点的向量表示， $\bar{\mathbf{u}} = (u, v, 1)^T$ 为相应的图像坐标系下的归一化向量。图像坐标系与相机坐标系之间的关系为

$$\bar{\mathbf{u}} = s\mathbf{K}\mathbf{X}_c, \quad (3)$$

$$\mathbf{K} = \begin{bmatrix} f_x & f_x k_s & u_0 \\ 0 & f_y & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (4)$$

式中 s 为一个尺度因子， \mathbf{K} 为一个秩为 3 的透视相机的内参矩阵， f_x 和 f_y 是以像素表示的横向和纵向焦距， k_s 为倾斜因子， (u_0, v_0) 为主点坐标。内参矩阵可以用现有的标定工具箱^[12]事先获取。

3.2 镜面位姿的可行解估计

通过镜面边缘的成像来计算镜面位姿的可行解。这里假设大部分镜面边缘的成像在图像中。如图 3 所示(彩图请见网络电子版)，相机坐标系的原点 O_c 是光心， Z_c 轴是光轴。则镜面边缘的图像为一椭圆，用二次曲线表示为

$$Au^2 + Bv^2 + 2Cu + 2Dv + 2Euv + F = 0. \quad (5)$$

表示成矩阵的形式为

$$\bar{\mathbf{u}}^T \mathbf{Q}_t \bar{\mathbf{u}} = 0, \quad (6)$$

$$\mathbf{Q}_t = \begin{bmatrix} A & E & C \\ E & B & D \\ C & D & F \end{bmatrix}, \quad (7)$$

式中 $\bar{\mathbf{u}} = (u, v, 1)^T$ 表示镜面边缘的图像坐标。 \mathbf{Q}_t 为镜面边缘成像的椭圆系数矩阵。由(3)式和(6)式可以得到相机坐标系下的倾斜椭圆锥 \mathbf{Q}_c 满足

$$s^2 \mathbf{X}_c^T \mathbf{Q}_c \mathbf{X}_c = 0, \quad (8)$$

$$\mathbf{Q}_c = \mathbf{K}^T \mathbf{Q}_t \mathbf{K}. \quad (9)$$

如图 3 所示，镜面边缘坐标系 $O_{mb} - X_{mb} Y_{mb} Z_{mb}$ 的原点 O_{mb} 与相机的光心 O_c 重合， Z_{mb} 轴平行于镜面边缘的法向量。在镜面边缘坐标系中，在 $Z_{mb} = z_0$ 平面上半径为 r_0 、圆心为 $\mathbf{C}_{mb} = (x_0, y_0, z_0)^T$ 的镜面边缘圆表示为^[13]

$$\mathbf{X}_{mb}^T \mathbf{M} \mathbf{X}_{mb} = 0, \quad (10)$$

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -x_0/z_0 \\ 0 & 1 & y_0/z_0 \\ -x_0/z_0 & y_0/z_0 & (x_0^2 + y_0^2 - r^2)/z_0^2 \end{bmatrix}, \quad (11)$$

式中 \mathbf{X}_{mb} 表示的是在镜面边缘坐标系下的镜面边缘上的点。

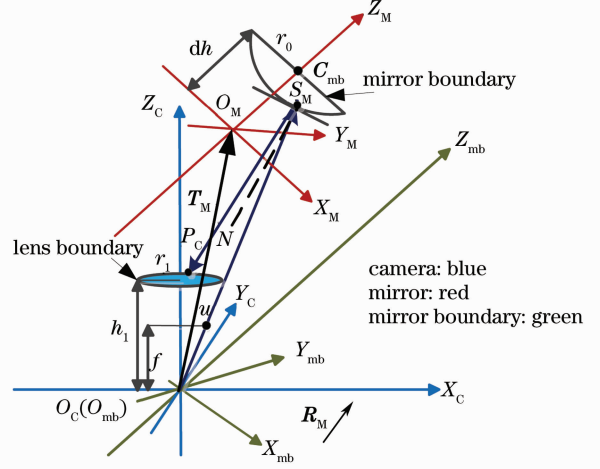


图 3 镜头边缘与三大坐标系的相对位置关系

Fig. 3 Relative position among lens boundary and three coordinate systems

因此根据坐标系的定义，镜面边缘坐标系与相机坐标系间仅存在一个旋转变换 \mathbf{R}_M ，即

$$\mathbf{X}_c = \mathbf{R}_M \mathbf{X}_{mb}. \quad (12)$$

联立(6)式，(8)式和(10)式，可以得到

$$s^2 \mathbf{R}_M^T \mathbf{Q}_c \mathbf{R}_M = \mathbf{M}. \quad (13)$$

为解(3)式，首先将 \mathbf{Q}_c 进行特征值分解为

$$\mathbf{Q}_c = \mathbf{V} \mathbf{A} \mathbf{V}^T, \quad (14)$$

式中 $\mathbf{A} = \text{diag}\{\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3\}$ 为特征值矩阵， $\mathbf{V} = (v_1, v_2, v_3)$ 为特征值对应的特征向量矩阵。由(10)式和(11)式，可得

$$s^2 \mathbf{R}^T \mathbf{A} \mathbf{R} = \mathbf{M}, \quad (15)$$

式中 $\mathbf{R} = \mathbf{V}^T \mathbf{R}_M$ 。解 $\mathbf{R}^T \mathbf{R} = \mathbf{I}$ 和(15)式，最终得到 $\mathbf{R}^{[13]}$ ：

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} g_1 \cos \theta & S_1 g_1 \sin \theta & S_2 g_2 \\ \sin \theta & -S_1 \cos \theta & 0 \\ S_1 S_2 g_2 \cos \theta & S_2 g_2 \sin \theta & -S_1 g_1 \end{bmatrix}, \quad (16)$$

式中 θ 为自由变量， S_1 和 S_2 为待定的符号变量，

$$\begin{cases} g_1 = \sqrt{(\lambda_2 - \lambda_3)/(\lambda_1 - \lambda_3)} \\ g_2 = \sqrt{(\lambda_1 - \lambda_2)/(\lambda_1 - \lambda_3)} \\ \lambda_1 \lambda_2 > 0, |\lambda_1| > |\lambda_2| \end{cases} \quad (17)$$

因此从(12)，(13)以及(15)式可得，镜面边缘坐标系与相机坐标系之间的旋转变换可表示为

$$\mathbf{R}_M = \mathbf{V}\mathbf{R}. \quad (18)$$

最终得到镜面边缘坐标系下镜面边缘圆心 z_0 、相机坐标系下镜面边缘圆心 C_C 和单位法向量 \mathbf{n}_C :

$$\begin{cases} z_0 = S_3 \lambda_2 \frac{r_0}{\sqrt{-\lambda_1 \lambda_3}}, \\ \mathbf{n}_C = \mathbf{R}_M(0, 0, 1)^T = \mathbf{V}(S_2 g_2, 0, -S_1 g_1)^T, \\ C_C = \mathbf{R}_M C_{mb} = z_0 \mathbf{V}(S_2 g_2, 0, -S_1 g_1 \frac{\lambda_1}{\lambda_2})^T. \end{cases} \quad (19)$$

式中 S_3 是待定的符号变量。

图 3 中 $O_M - X_M Y_M Z_M$ 中, Z_M 轴平行于镜面的单位法向量且是反射镜面的对称轴, 但坐标系的原点 O_M 与光心不重合。因此, 镜面坐标系与相机坐标系之间除了存在一个旋转变换 \mathbf{R}_M 外, 还存在一个平移变换:

$$\mathbf{T}_M = C_C - \mathbf{R}_M(0, 0, dh)^T. \quad (20)$$

3.3 同时镜头边缘参数估计及镜面位姿选择

综上所述(19)式和(20)式总共给出了镜面位姿的四组可行解。在实际应用中, 限定 \mathbf{n}_C 指向远离相机的方向且 C_C 在透视相机的前方, 即可得到两组具有物理意义的合理的候选解 $\{\mathbf{R}_M^i, \mathbf{T}_M^i\} (i=1, 2)$ 。为了得到正确的镜面位姿参数, 必须使用其他的约束条件。为了达到自标定镜面参数的目的, 提出一种基于镜头边缘成像匹配的镜面位姿选择法。

在折反射全向相机获得的图像中, 除了镜面边缘外, 相机镜头边缘的像也是一个椭圆, 其形状、位置和大小都由镜面位姿 ($\{\mathbf{R}_M^i, \mathbf{T}_M^i\} (i=1, 2)$) 决定的。因此, 镜面位姿可以通过比较观测到的镜头边缘的像与由两组可能的镜面位姿预测得到的镜头边缘的像之间的相似度来唯一确定。

这种选择方式与系统中所用到的镜面形状无关。为了清晰起见, 用由(1)式表示的双曲面来举例说明这种方法。

如图 3 所示, 假设镜头边缘中心位于距离透视相机光心前方 h_1 的位置, 且其半径为 r_1 。在实际应用中, r_1 是已知的, 而 h_1 未知, 但可以通过我们后面所采用的搜索方法估计出来。给定镜面与透视相机之间的位姿参数, 预测镜头边缘的成像问题就转化为找到相应的镜面点, 使得在该点的入射角等于反射角。为了计算正确的镜面反射点, 首先通过获得的两组镜面位姿解 $\{\mathbf{R}_M^i, \mathbf{T}_M^i\} (i=1, 2)$, 将相机坐标系下光心坐标 O_C 和镜头边缘上 L (本文中 $L=6$) 个等角度均匀取样点 $\mathbf{P}_C^j = (r_1 \cos \theta_j, r_1 \sin \theta_j, h_1)^T (j=0, 1, \dots, L-1), (\theta_j \in [0, 2\pi])$, 转换到镜面坐标系

下得到 $\mathbf{P}_M^j = (P_X^j, P_Y^j, P_Z^j)^T$ 和 O_M^i :

$$O_M^i = \mathbf{R}_M^{iT} (O_C - \mathbf{T}_M^i), \quad (21)$$

$$\mathbf{P}_M^j = \mathbf{R}_M^{iT} (\mathbf{P}_C^j - \mathbf{T}_M^i). \quad (22)$$

由图 3 可知, 对于每一个镜头边缘点 $\mathbf{P}_M^j = (P_X^j, P_Y^j, P_Z^j)^T$, 在反射镜面上存在相应的镜面点 $\mathbf{S}_M^j = (S_X^j, S_Y^j, S_Z^j)^T$, 使得该点处的法向量平分角 $\angle \mathbf{P}_M^j \mathbf{S}_M^j O_M^i$ 。将表示反射镜面的函数改写为

$$F(X_M, Y_M) = Z_M = \sqrt{a_m^2 \left(1 + \frac{X_M^2 + Y_M^2}{b_m^2} \right)}. \quad (23)$$

并求得其偏导 F_{X_M} 和 F_{Y_M} 。因此在镜面点 \mathbf{S}_M^j 处的法向量可以表示为

$$\mathbf{N}_M^j = [F_{X_M}(\mathbf{S}_M^j), F_{Y_M}(\mathbf{S}_M^j), -1]. \quad (24)$$

对(24)式进行归一化得归一化法向量 $\mathbf{N}_M^j = (N_X^j, N_Y^j, N_Z^j)$ 。由反射定律的矩阵表示法得

$$\mathbf{H}_M^j = \mathbf{A} \mathbf{G}_M^j,$$

$$\mathbf{H}_M^j = (O_X^i - S_X^j, O_Y^i - S_Y^j, O_Z^i - S_Z^j)^T,$$

$$\mathbf{G}_M^j = (S_X^j - P_X^j, S_Y^j - P_Y^j, S_Z^j - P_Z^j)^T,$$

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 1 - 2N_X^{j2} & -2N_X^j N_Y^j & -2N_X^j N_Z^j \\ -2N_X^j N_Y^j & 1 - 2N_Y^{j2} & -2N_Y^j N_Z^j \\ -2N_X^j N_Z^j & -2N_Y^j N_Z^j & 1 - 2N_Z^{j2} \end{bmatrix}, \quad (25)$$

式中 $\mathbf{H}_M^j = (H_X^j, H_Y^j, H_Z^j)^T$ 和 $\mathbf{G}_M^j = (G_X^j, G_Y^j, G_Z^j)^T$ 表示反射向量 \mathbf{H}_M^j 和入射向量 \mathbf{G}_M^j 的归一化形式。

接下来通过构建如下所示的最小化目标函数来求镜面点 \mathbf{S}_M^j :

$$\begin{aligned} \mathbf{S}_M^j = \operatorname{argmin}_{\mathbf{S}_M^j} \{ & \|\mathbf{R}_M^i - \mathbf{A} \mathbf{G}_M^j\|^2 + \\ & [Z_M - F(X_M, Y_M)]^2 \}. \end{aligned} \quad (26)$$

最后将镜面坐标系下的镜面点 \mathbf{S}_M^j 转换到相机坐标系下 \mathbf{S}_C^j , 通过透视投影获得镜头边缘的预测成像:

$$\mathbf{S}_C^j = \mathbf{R}_M^i \mathbf{S}_M^j + \mathbf{T}_M^i, \quad (27)$$

$$\mathbf{u}_{ij} = s \mathbf{K} \mathbf{S}_C^j. \quad (28)$$

为了得到正确的镜面位姿, 利用最小二乘椭圆拟合法^[14]分别对观测的和预测的镜头边缘成像进行椭圆拟合, 将椭圆分别标注为 J_0 、 J_1 和 J_2 。由于噪声的存在以及 h_1 偏离真实值, 导致实际观测到的镜头成像与预测到的镜头成像不完全重合, 如图 4 所示。

为了衡量实际图像与预测图像的相似度, 提出一种椭圆相似度比较法。具体而言, 首先从镜头边缘的实际成像的椭圆 J_0 中心 \mathbf{u}_0 每隔固定的角度 $2\pi/W$ 往椭圆 $J_k (k=0, 1, 2)$ 拉 W (本文中 $W=200$) 条射线, 分别与三个椭圆相交于 $\mathbf{u}_{kl} (k=0, 1, 2; l=0,$

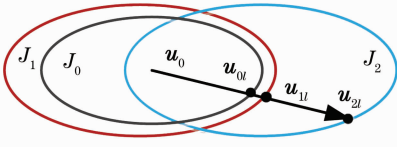


图4 镜面位姿选择示意图

Fig. 4 Illustration of mirror pose selection

1, 2, ..., W-1)。用平均误差来衡量预测图像 J_k ($k=1, 2$) 与观测图像 J_0 的相似度, 平均误差越小, 相似度越大, 平均误差表示为

$$e_k = \sqrt{\left(\sum_l \|u_{0l} - u_{kl}\|^2\right)/W}, \quad k=1, 2; \\ l=0, 1, 2, \dots, W-1 \quad (29)$$

显然只有真实的距离 h_1 和正确的镜面位姿才可能使得预测的镜面边缘成像与观测成像之间的平均误差最小。由于 h_1 是个未知变量, 这里采用一维搜索的方法在 h_1 的合理搜索区间内 $[0, a_m + c_m]$ 进行搜索, 通过上述方法计算平均误差, 得到平均误差最小的那组 h_1 和镜面位姿参数即为正确的镜面位姿参数。

4 实验结果

为了证明该的标定算法的正确性和有效性, 将算法分别用于仿真数据和真实图像中。

4.1 仿真数据实验

在仿真实验中, 图像的分辨率为 $1280 \text{ pixel} \times 960 \text{ pixel}$, 透视相机的内参设置如下: $f_x = f_y = 1500$, $u_0 = 640$, $k_s = 0$, $v_0 = 480$, 镜面边缘圆的半径

为 $r_0 = 0.028 \text{ m}$, 圆心与镜面坐标系原点的距离为 $dh = 0.0425 \text{ m}$ 。镜头边缘圆的参数为 $r_1 = 0.018 \text{ m}$, $h_1 = 0.02 \text{ m}$ 。双曲镜面的参数为: $a_m = 0.028 \text{ m}$, $b_m = 0.023 \text{ m}$ 。折反射相机系统的镜面位姿被设置为: 镜面边缘的法向量为 $\mathbf{n}_c = (0.0349, -0.0523, 0.9980)^T$, 镜面边缘圆的圆心坐标为 $\mathbf{C}_c = (0.0002, 0.0005, 0.083)^T$ 。基于以上仿真数据, 可以很容易生成仿真数据用于标定。

在标定过程中, 设定 h_1 的候选搜索区间为 $[0.01, 0.03]$ 。表1为仿真数据的标定结果。它表明所提标定算法是有效的, 基于镜头边缘的镜面位姿选择法可以找出正确的候选解, 并能同时估计出镜头边缘参数 h_1 。图5表示的是搜索过程中随着 h_1 变化的正确位姿对应的平均误差, 以及两组位姿平均误差相对比的变化趋势。图5显示在 $h_1 = 0.02 \text{ m}$ 的时候, 平均误差 e_1 达到最小且误差比 e_2/e_1 达到最大。直观上说明此时第一组解和实际情况差别最小, 同时第二组解和第一组解所造成的差别最大, 正确解(第一组)最容易被选出。实际的图6(a)~(c)(彩图见网络电子版)分别表示的是当 $h_1 < 0.02 \text{ m}$, $h_1 = 0.02 \text{ m}$, $h_1 > 0.02 \text{ m}$ 时候两组预测的镜头边缘成像(红色和蓝色)与实际观测到的镜头边缘成像(黑色)之间的相对位置关系。由图6(a)~(c)可见只有当检测到的 h_1 等于其真实值时, 用正确的那组镜面位姿生成的观测成像与预测成像才基本重合。图6(d)表示的是 h_1 搜索过程中步长选择对 h_1 估计结果的影响。该图表明算法对 h_1 的步长选择并不敏感, 可以用 1 mm 的大步长, 迅速获得 h_1 的估计并同时选择出正确的镜面位姿候选解。

表1 仿真数据标定结果

Table 1 Calibration results with simulation data

| Parameters | Calibration result |
|---------------------------------------|--|
| Mirror center \mathbf{C}_c/m | $\mathbf{C}_{c1} = (0.0002, 0.0005, 0.0830)^T$, $\mathbf{C}_{c2} = (0.0008, -0.0005, 0.0830)^T$ |
| Translation \mathbf{T}_M/m | $\mathbf{T}_{M1} = (-0.0013, 0.0027, 0.0406)^T$, $\mathbf{T}_{M2} = (0.0017, -0.0027, 0.0406)^T$ |
| Rotation \mathbf{R}_M/m | $\mathbf{R}_{M1} = \begin{bmatrix} -0.6299 & -0.7759 & 0.0349 \\ 0.7742 & -0.6308 & -0.0523 \\ 0.0626 & -0.0059 & 0.9980 \end{bmatrix}$, $\mathbf{R}_{M2} = \begin{bmatrix} -0.6305 & -0.7758 & -0.0235 \\ 0.7742 & -0.6308 & -0.0524 \\ -0.0555 & 0.0149 & 0.9983 \end{bmatrix}$ |
| Height h_1/m | 0.02 |
| Average error /pixels | 0.0847 |
| Final mirror pose | $\mathbf{T}_{M1}, \mathbf{R}_{M1}, h_1$ |

以上实验结果并没有考虑镜面边缘成像, 镜头、镜面边缘提取以及椭圆拟合过程中存在的噪声影响。为了验证该标定算法的抗噪声性能, 分别给镜面边缘成像、镜头边缘成像和镜面边缘成像两者同时加上均值为 0, 方差为 σ 的高斯白噪声。 σ 从

0.5~5.0 pixel, 以 0.5 pixel 为步进逐次生成仿真数据。对每个噪声级别, 分别生成 100 组仿真数据, 并利用标定方法计算镜面位姿和 h_1 。在所有仿真实验中, 方法均计算并可靠地选出了正确的标定结果。对标定结果与真值之间误差的均值和方差进行

了统计,结果列于图 7 中。图 7 分别表示了镜面边缘的法向量 n_c 的角度误差[单位为($^{\circ}$)],最终的平均误差(单位为 pixel)以及检测到的 h_1 的误差(单位为 m)与所加噪声等级之间关系。由图 7 可知,在

给定的噪声等级测试条件下,算法都能准确地找到与真值接近的镜面位姿参数,整体误差随噪声增加呈缓慢线性增长趋势,可见该算法对具有良好的抗噪性能。

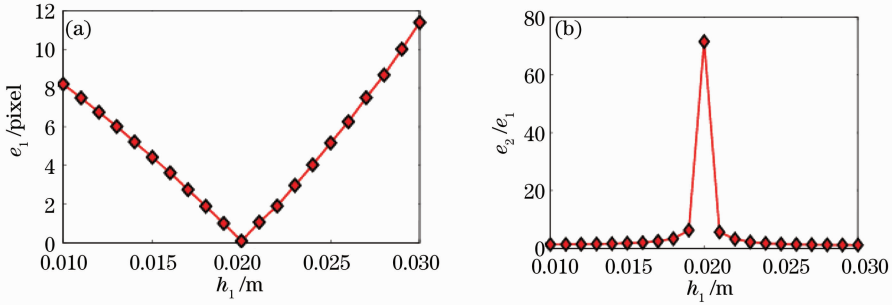


图 5 (a) e_1 随 h_1 的变化趋势; (b) e_2/e_1 随 h_1 的变化趋势

Fig. 5 (a) Change of e_1 with respect to h_1 ; (b) change of e_2/e_1 with respect to h_1

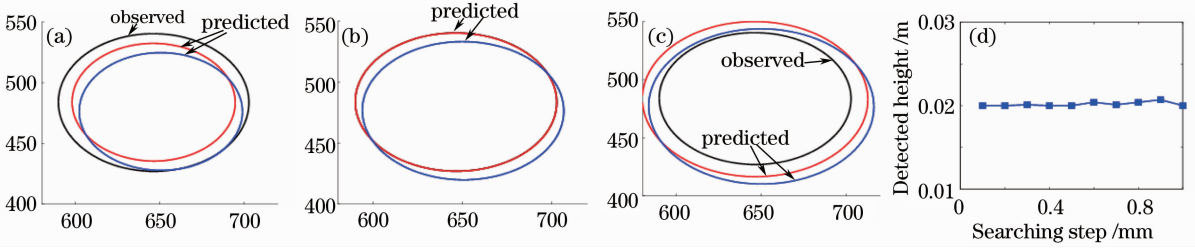


图 6 仿真结果。(a)~(c)当 $h_1 < 0.02$, $h_1 = 0.02$ 和 $h_1 > 0.02$ 时观测到的镜头边缘成像(黑色)与两个预测成像(红色和蓝色)的相对位置关系(d) h_1 随搜索步长变化的趋势

Fig. 6 Simulation results. (a)~(c) relative positions between observed (black) and two predicted images (red and blue) of lens when $h_1 < 0.02$, $h_1 = 0.02$ and $h_1 > 0.02$, (d) the resulting h_1 with respect to the change of step length in searching process

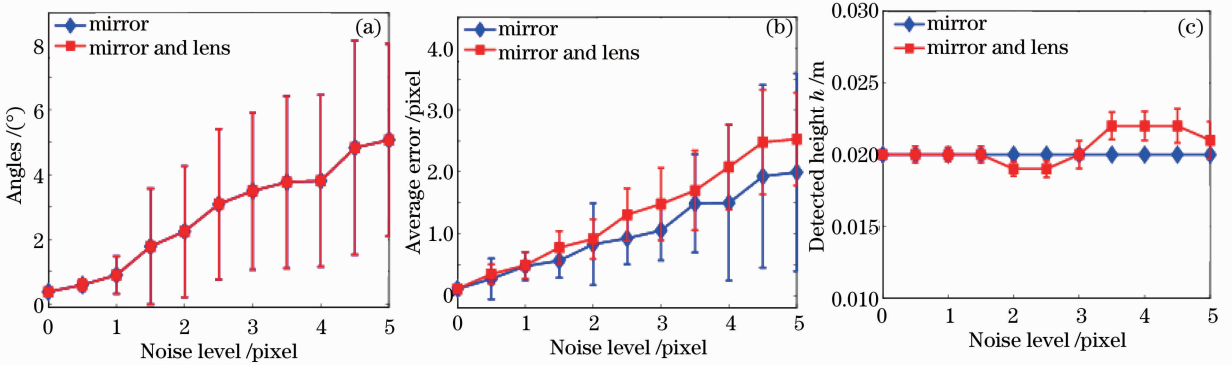


图 7 在镜面边缘加噪、镜头边缘和镜面边缘两者同时加噪的仿真结果。(a)法向量的角度误差及方差; (b)平均像素误差及方差;(c) h_1 的误差及方差

Fig. 7 Simulation results when effect of noise is considered. The noise are added to the lens boundary, both the lens and mirror boundary respectively. (a) Direction error and variance of normal vector; (b) averaged pixel error and variance; (c) error and variance of detected h_1 . The horizontal axis are noise level from 0 to 5 pixel

4.2 真实数据实验

在真实图像[图 8(a)]的测试中,使用了如图 8(b)所示的由 NeoVision 制造的折反射相机系统(彩图请见网络电子版)。它原本是由 H3S 双曲

镜面^[15]和 Sony XCD-SX910CR 相机组合成的单视点折反射相机。当光轴与镜面中心轴不完全重合情况下,该相机就成为非单视点折反射相机系统。此时若还是采用单视点相机标定方法将带来较大的误

差。透视相机 XCD-SX910CR 的内参如下： $f_x = 1455.07, f_y = 1459.51, k_s = 0, u_0 = 639.2, v_0 = 482.2$ 。图像的分辨率为 $1280 \text{ pixel} \times 960 \text{ pixel}$ 。镜头边缘圆的半径为 $r_1 = 0.0185 \text{ m}$ 。在标定前首先对图像进行了矫正以去除透视相机的径向和切向畸变。表 2 为真图的标定结果。实际观测的镜头边缘成像和预测的镜头边缘成像之间的平均误差为 1.9204 pixel ，考虑到相机的高分辨率以及实际存在的成像噪声，这样的结果是很令人满意的。

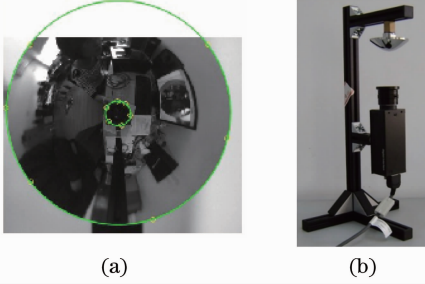


图 8 (a) 真实图像；(b) NeoVision 折反射相机，黄色的点表示用于椭圆拟合的抽样点，绿色的圈为拟合的椭圆

Fig. 8 (a) Two boundaries in real image. (b) NeoVision catadioptric camera system used in our experiment. The yellow dots are sampled points in mirror and lens boundary for ellipse fitting, the green circle is the resulting fitted ellipses

表 2 真实图像的标定结果

Table 2 Calibration results with data of real image

| Parameters | Calibration results |
|------------------|--|
| C_C/m | $(-0.0012, 0.0040, 0.0815)^T$ |
| T_M/m | $(-0.0011, -0.0054, 0.0359)^T$ |
| n_C | $(-0.0024, 0.0316, 0.9995)^T$ |
| R_M | $\begin{bmatrix} -0.1518 & 0.9884 & -0.0024 \\ -0.9879 & -0.1517 & 0.0316 \\ 0.0309 & 0.0072 & 0.9995 \end{bmatrix}$ |
| h_1/m | 0.014 |
| e/pixel | 1.9204 |

4.3 应用

为了进一步验证标定算法的有效性，使用由三个正交的标定模板组成的一个模板立方体，计算各个平面模板之间的夹角，如图 9 红色框中所示(彩图请见网络电子版)。先通过上文获得的标定参数，对含有模板立方体的局部图像找到近似的单一视点，得到对应的近似透视图像。然后使用传统的透视相机标定工具箱^[12]标定出图中立方体三个平面的外参，进而求得三个平面间的夹角 $\theta_1, \theta_2, \theta_3$ 。为了比较标定的精度，还分别使用默认出厂配置参数，以及

Mei 等^[16,17]的全向视觉系统标定方法得到的镜面位姿参数，用同样的方法求平面间的夹角。实验结果列在表 3 中。理想情况下，三个夹角都应该是 90° 。从表 3 的结果可以看出，用本文算法的标定结果计算所得的三个夹角比未标定的默认出厂参数所得的结果明显要优。同时，和 Mei 等^[16]标定方法所得的结果相比，本文算法所获得的精度也有一定的提高。

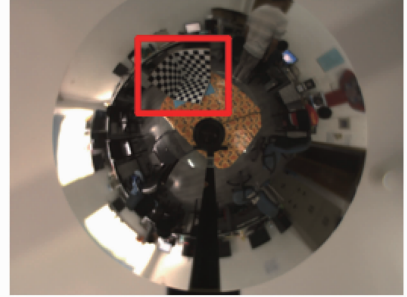


图 9 含有模板立方体的真实图像

Fig. 9 Real image containing the trihedron

表 3 立方体三个平面间的夹角

Table 3 Angles between three planes of the triheron

| | $\theta_1/(\circ)$ | $\theta_2/(\circ)$ | $\theta_3/(\circ)$ |
|-----------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| Factory configuration | 78.6 | 95.1 | 79.8 |
| Mei's method | 78.7 | 98.1 | 86.3 |
| Scaramuzza's method | 87.1 | 115.7 | 97.7 |
| Our method | 83.6 | 96.5 | 87.8 |

5 结论

提出了一种新颖的非单视点折反射相机系统镜面位姿的自标定方法。该算法首先利用镜面边缘的成像获得四个可能的镜面位姿候选解，然后通过基于镜头边缘的镜面位姿选择法获得正确的位姿参数。该算法不需要任何其他的标定物，而仅仅利用相机系统本身拍摄的一幅图像就可以标定出透视相机与反射镜面之间的旋转和平移参数。仿真和真图实验结果表明该算法的正确性、有效性以及其对噪声的稳健性。

参考文献

- Zeng Jiyong, Su Xianyu. Hyperboloidal catadioptric omnidirectional imaging system[J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, **23**(9): 1138~1142
曾吉勇, 苏显渝. 双曲面折反射全景成像系统[J]. *光学学报*, 2003, **23**(9): 1138~1142
- B. Micusik, T. Pajdla. Para-catadioptric camera auto-calibration from epipolar geometry [C]. *Proceedings of the Asian Conference on Computer Vision*, Jeju Island: Asian Federation of Computer Vision Societies, 2004, **2**: 748~753

- 3 Xianghua Ying, Zhang Hu. Catadioptric camera calibration using geometric invariants [J]. *IEEE Transaction on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2004, **26**(10): 1260~1271
- 4 Lei Zhang, Xin Du, Yunfeng Zhu *et al.*. Central catadioptric camera calibration with single image [C]. Proceedings of IEEE International Conference on Computer Acoustics, Speech, and Signal Processing, Taipei; IEEE Press, 2009, **1-8**: 1253~1256
- 5 A. Shabayek. Non-Central Catadioptric Sensors Auto-Calibration [D]. France; Université de Bourgogne, 2009
- 6 J. Fabrizio, J.-P. Tarel, R. Benosman. Calibration of panoramic catadioptric sensors made easier [C]. Proceedings of Third Workshop on Omnidirectional Vision, Los Alamitos; IEEE Press, 2002: 45~52
- 7 T. Mashita, Y. Iwai, M. Yachida. Calibration method for misaligned catadioptric camera [J]. *IEEE Transactions on Information and Systems*, 2006, **E89-D(7)**: 1984~1993
- 8 O. Morel, D. Fofi. Calibration of catadioptric sensors by polarization imaging [C]. IEEE International Conference on Robotics and Automation, Roma; 2007: 3939~3944
- 9 D. Stelow, J. Mishler, D. Koes *et al.*. Precise omnidirectional camera calibration [C]. IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, Kauai, 2001, **1**: 689~694
- 10 N. Goncalves, H. Araujo Estimating parameters of noncentral catadioptric systems using bundle adjustment [J]. *Computer Vision and Image Understanding*, 2009, **113**(1): 11~28
- 11 Lei Jie, Du Xin, Liu Jilin. A generalized rectification algorithm for co-axis omni-directional stereo system [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(7): 1984~1988
雷 杰, 杜 歆, 刘 济 林. 一种通用的共轴全向立体系统极线校正方法[J]. *光学学报*, 2010, **30**(7): 1984~1988
- 12 J. Y. Bouguet. Camera calibration toolbox for Matlab [OL]. <http://www.vision.caltech.edu/bouguetj/calib>, 2010-10-01
- 13 Q. Chen, H. Wu, T. Wada. Camera calibration with two arbitrary coplanar circles [C]. Proceedings of European Conference on Computer Vision, Prague, 2004, **3023**: 521~532
- 14 A. Fizigibbon, M. Pilu, R. B. Fisher. Direct least square fitting of ellipses [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1999, **21**(5): 476~480
- 15 Neovision, Industrial vision system H35-hyperbolic stainless steel mirror [OL]. <http://www.neovision.cz/prods/panoramic/h3s.html>, 2009-07-09
- 16 C. Mei, P. Rives. Single view point omnidirectional camera calibration from planar grids [C]. Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation, Italy, 2007. 3945~3950
- 17 D. Scaramuzza, A. Martinelli, R. Siegwart. A toolbox for easy calibrating omnidirectional cameras [C]. Proceedings of the IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems, Beijing, 2006. 5695~5701

栏目编辑: 李文喆