

文章编号 1004-924X(2011)08-1957-07

回转体形貌测量中的相机自标定

李雅倩, 林洪彬*

(燕山大学 电气工程学院, 河北 秦皇岛 066004)

摘要:为实现回转体形貌测量系统的相机自标定,研究了回转体对象的透视投影特性,提出了一种基于被测回转体对象自约束特征的摄像机内、外参数自动标定方法。首先,利用被测场景中回转体截面特征易于提取的特性,从测得图像提取场景中的截面椭圆,利用正交于回转轴的截面椭圆求取圆环点的像,并结合极线约束建立绝对二次曲线像的全约束方程;然后,通过对求取的绝对二次曲线矩阵进行 Cholesky 分解获得相机的内参数。其次,在求得的内参数矩阵的基础上,通过回转轴和截面图像的成像特点建立测量系统外参数方程,求解测量系统外部参数。实验结果表明,利用本文方法进行相机内参数标定的精度优于 0.95%,外参数标定精度优于 5.6%。该方法只需利用被测对象自身几何约束,不需任何标定板和标定块,标定过程简单有效,能够满足工程实际需要。

关键词:形貌测量;回转体;标定;圆环点;极线约束

中图分类号: TP391.4; TP212.12 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20111908.1957

Camera calibration in morphology measurement of axisymmetric body

LI Ya-qian, LIN Hong-bin*

(Institute of Electrical Engineering, Yanshan University, Qinhuangdao 066004, China)

* Corresponding author, E-mail: honphin@ysu.edu.cn

Abstract: To realize the automatic calibration of the camera used in morphology measurement of an axisymmetric body, the perspective projection characteristics of the axisymmetric body were investigated, and a automatic calibration method for intrinsic and extrinsic parameters of the measuring camera was proposed based on self constraint characteristics of measured axisymmetric body. Firstly, by utilizing the extration of section fetures easily, the ellipses in the images of axisymmetric body cross sections were estimated to obtain the images of the circular points. Then, combining with the epipolar constraint, the full constraint equations of the image for an absolute conic were established and computed to obtain the camera intrinsic parameters by Cholesky's factorization. Secondly, based on the intrinsic matrix of the camera, the extrinsic parameter equations were established by using the image of the symmetry axis and cross sections to solve the extrinsic parameters. Experimental results indicate that the relative precision of the intrinsic parameters is better than 0.95% and that of the extrinsic parameters is 5.6%. By utilizing only the axisymmetric constraints of the measured object without the calibration plate or block, the calibration process is simple, effective, and can satisfy the real needs.

收稿日期:2011-01-19;修订日期:2011-03-28.

基金项目:国家科技重大专项资助项目(No. 2010ZX04017-013);河北省科学技术研究与发展计划资助项目(No. 10212152);秦皇岛市科学技术研究与发展计划资助项目(No. 201001A077)

Key words: morphology measurement; axisymmetric body; calibration; circular point; epipolar constraint

1 引言

回转体对象的三维形貌精确测量在机械加工、航空航天、国防和军事等领域均具有重要地位^[1]。利用视觉系统进行回转体对象三维形貌测量的关键在于相机(摄像机)系统内部和外部参数的标定。目前,相机(摄像机)标定方法主要有如下几类:传统标定方法、自标定方法和基于主动视觉的标定方法。传统标定方法是利用标定板(块)作为空间参照物的内参数标定方法,如:DLT方法^[2],Tsai氏两步法^[3],张氏标定法^[4]等,这类方法的标定精度高,但是标定过程中需要对标定板(块)图像进行特征匹配。自标定方法是利用图像中场景的约束信息求取测量系统参数的方法,如:基于绝对二次曲线的自标定算法^[5],基于绝对二次曲面的自标定算法^[6]以及基于分层重建的标定算法^[7]和基于基线、隐消点、共面点的标定方法^[8-12]等,这类方法避免了传统标定方法中的模板和特征匹配的问题,但需要被测场景中具有相应的特征约束,算法的鲁棒性不高。基于主动视觉的标定方法是“已知摄像机的某些运动信息”下标定摄像机的方法,如:胡占义,吴福朝^[13]提出的基于主动视觉的标定方法等,这类方法的主要优点是:由于在标定过程中知道了一些摄像机的运动信息,所以一般来说,摄像机的模型参数可以线性求解,算法的鲁棒性比较高。此外,Tardif等^[14-15]还研究了基于畸变修正的标定方法等。

针对回转体对象三维形貌精确测量系统参数标定问题。本文提出了一种基于场景中两个回转对象自约束特征的测量系统参数标定方法。通过回转体图像中正交于回转轴的两个截面曲线方程求取正交于回转轴的截面族的圆环点的像,并结合极线约束建立测量系统绝对二次曲线像的约束方程,进一步通过约束方程的求解和Cholesky分解确定测量系统的内参数矩阵。利用回转轴、回转轴的像与摄像机光心的空间共面特性和截面曲线的投影特性进行外参数的求取实现测量系统的自动标定。

2 摄像机成像模型与圆环点的概念

三维空间中的点 $\mathbf{M}=[x, y, z]^T$ 在摄像机获取的二维图像上的成像点记为 $\mathbf{m}=[u, v]^T$, 相应的齐次坐标分别记为 $\tilde{\mathbf{M}}=[x, y, z, t]^T$ 和 $\tilde{\mathbf{m}}=[u, v, t]^T$, 假设摄像机满足针孔成像模型, 则空间点 \mathbf{M} 与图像点 \mathbf{m} 之间的射影关系可表示为^[10]:

$$z_c \tilde{\mathbf{m}} = \mathbf{K}[\mathbf{R} \quad \mathbf{T}] \tilde{\mathbf{M}}, \quad (1)$$

其中, z_c 为非零尺度因子, $[\mathbf{R} \quad \mathbf{T}]$ 为摄像机坐标系相对世界坐标系变换矩阵, \mathbf{K} 为摄像机内参数矩阵, 形式为:

$$\mathbf{K} = \begin{bmatrix} \alpha & \gamma & u_0 \\ 0 & \beta & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (2)$$

\mathbf{R} 是摄像机坐标系相对于世界坐标系的旋转矩阵, \mathbf{T} 为摄像机在世界坐标系中的空间坐标。

在三维投影空间中, 满足 $t=0$ 的点称为无穷远点, 所有无穷远点构成无穷远平面。无穷远平面上满足 $\tilde{\mathbf{M}}^T \tilde{\mathbf{M}}=0$ 的点构成了绝对二次曲线 Ω 。而 Ω 的像 ω 与摄像机内参数矩阵之间满足如下关系:

$$\omega = \mathbf{K}^{-T} \mathbf{K}^{-1}. \quad (3)$$

因此, 若能确定绝对二次曲线的像即可通过Cholesky分解确定摄像机的内参数矩阵 \mathbf{K} 。

无穷远直线 l_∞ 上的两个点 $\mathbf{I}=(1, i, 0, 0)^T$, $\mathbf{J}=(1, -i, 0, 0)^T$ 称为圆环点。若用 i, j 分别表示 \mathbf{I}, \mathbf{J} 的像, 则有:

$$\begin{cases} \mathbf{i}^T \omega \mathbf{i} = 0 \\ \mathbf{j}^T \omega \mathbf{j} = 0 \end{cases}, \quad (4)$$

由于 \mathbf{I}, \mathbf{J} 互为共轭, 故其透视投影 \mathbf{i}, \mathbf{j} 也互为共轭, 因此, 式(4)等价于:

$$\begin{cases} \operatorname{Re}(\mathbf{i}^T \omega \mathbf{i}) = 0 \\ \operatorname{Im}(\mathbf{i}^T \omega \mathbf{i}) = 0 \end{cases}. \quad (5)$$

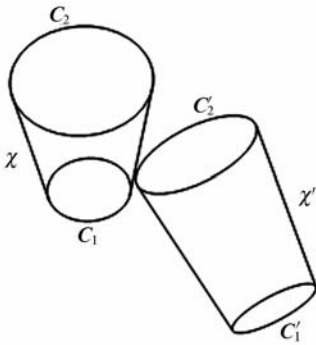
3 内参数标定

由式(5)可知, 若能从测得图像中提取圆环点的图像 \mathbf{i}, \mathbf{j} , 即可以构建绝对二次曲线的部分约束方程。以两个水杯为被测对象, 测得图像如图 1

(a)所示。对图 1(a)图像进行边缘特征提取和曲线拟合。由于已知被测对象为回转对象,在进行截面拟合时可直接利用椭圆的最小二乘拟合,解决了局部遮挡情况下不完全可见截面曲线拟和的问题。由图 1(a)提取的特征曲线如图 1(b)所示。



(a) 水杯图像
(a) Image of cups



(b) 提取的特征曲线
(b) Extracted feature curves

图 1 水杯图像及从其提取的特征曲线
Fig. 1 Image and feature curves of cups

将图像中一个水杯的两个截面椭圆分别用 C_1 和 C_2 表示,侧轮廓线用曲线 χ 表示,另一个水杯的截面椭圆和轮廓线分别用 C_1' 、 C_2' 和 χ' 表示。则通过下述方程组:

$$\begin{cases} \mathbf{x}^T C_1 \mathbf{x} = 0 \\ \mathbf{x}^T C_2 \mathbf{x} = 0 \end{cases}, \quad (6)$$

可以解得两个椭圆的四个交点: $x_i, i=1, 2, 3, 4$ 。由于曲线 C_1 和 C_2 所在的空间截面为正交于回转轴的平行截面。对于相互平行的截面而言,如果两个截面椭圆像有一对共轭复交点,则这对共轭交点就是圆环点的像,记为: i, j 。由此,通过椭圆

C_1 和 C_2 的交点可以确定回转轴的像 l_s 、正交于回转轴的截面族的隐消线 l_∞ 、回转轴所隐消点 v_∞ 。椭圆交点与 l_s, l_∞, v_∞ 之间的关系如图 2 所示^[16]。

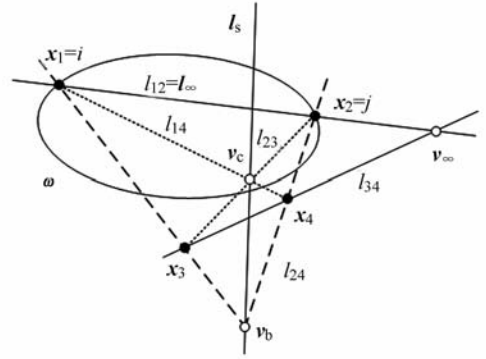


图 2 椭圆交点与隐消线、回转轴像之间的关系

Fig. 2 Relationship among intersection points of two ellipses, vanishing line and images of symmetry axis

将 i, j 带入式(5)可以得到 ω 的如下约束条件:

$$\begin{cases} \text{Re}(i^T \omega i) = 0 \\ \text{Im}(i^T \omega i) = 0 \end{cases}. \quad (7)$$

若回转轴的像 l_s 的方程及其隐消点 v_∞ 可求,则通过极线约束可以建立绝对二次曲线的另一个约束条件: $l_s = \omega v_\infty$ 。由此,通过图像中的一个回转体可以建立绝对二次曲线的如下约束:

$$\begin{cases} \text{Re}(i^T \omega i) = 0 \\ \text{Im}(i^T \omega i) = 0 \\ l_s = \omega v_\infty \end{cases}, \quad (8)$$

同理,通过椭圆 C_1' 和 C_2' 的交点可以确定回转轴的像 l_s' 、正交于回转轴的截面族的隐消线 l_∞' 、回转轴所隐消点 v_∞' ,并建立形式如(8)的另一组约束条件。如果场景中两个对象的回转轴不平行,根据上述方法通过图像中的两个回转体对象可以建立绝对二次曲线的 6 个独立约束条件。针孔模型相机具有 5 个待定的内参数,故通过最小二乘法可以求绝对二次曲线的像 ω 。进一步对 ω 进行 Cholesky 分解,可以确定相机的内参数矩阵 K 。

值得说明的是,当两个椭圆的交点是两对共轭复交点(不存在实交点)时,可以根据图像中两个椭圆的可视部位判断隐消线 l_∞ 与两个空间截面图像的相对位置关系,进而确定共轭复交点是

圆环点的像,具体方法见文献[17]。针对本文情况,空间截面像 C_1, C_2 与隐消线 l_∞ 的关系如图 3 所示。

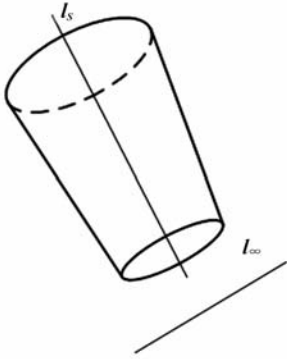


图 3 根据遮挡关系确定隐消线

Fig. 3 Determination of vanishing line by exploiting visibility conditions

4 外参数标定

将投影矩阵表示为:

$$P = K[R \ T], \tag{9}$$

其中: K 是摄像机内部参数矩阵, R 是世界坐标系与摄像机坐标系之间的旋转矩阵, T 是摄像机中心在世界坐标系中的坐标。在三维空间中,以曲线 C_1 所对应的截面中心点为原点,回转轴为 z 轴,摄像机中心位于 x 轴正半轴,建立右手坐标系为世界坐标系 $O_w - x_w y_w z_w$,世界坐标系与相机坐标系之间的关系如图 4 所示。

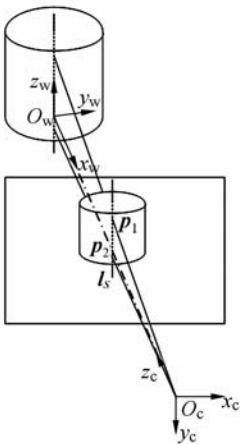


图 4 世界坐标系与相机坐标系之间的关系

Fig. 4 Relationship between world coordinate system and camera coordinate system

4.1 旋转矩阵 R 的计算

将矩阵 R 表示成如下形式:

$$R = [n_x, n_y, n_z], \tag{10}$$

其中: n_x, n_y, n_z 均为单位向量。

设 p_1, p_2 为回转轴像 l_s 上的两个点,则 p_1, p_2 和摄像机中心 O_c 构成空间平面 $Y=0$ 。 p_1, p_2 在摄像机坐标系中的坐标分别表示为: $\overline{O_c p_1} = K^{-1} p_1$ 和 $\overline{O_c p_2} = K^{-1} p_2$ 。因此,世界坐标系的 y_w 轴在摄像机坐标系中的方向可表示为: $\overline{O_c p_1} \times \overline{O_c p_2}$, 即: $n_y = \frac{\overline{O_c p_1} \times \overline{O_c p_2}}{|\overline{O_c p_1} \times \overline{O_c p_2}|}$ 。同理,通过隐消线 l_∞ 上的两点 v_∞ 和 $v_i = l_\infty \times l_s$ 可以确定单位向量 n_z 。进而, $n_x = n_y \times n_z$ 。

4.2 向量 T 的计算

设曲线 C_1 所对应的截面半径为 ρ , 投影矩阵为 P , 则平面 $z=0$ 上任意点 $[x, y, 0, 1]^T$ 的像可表示为:

$$\begin{aligned} x &= P \cdot [x, y, 0, 1]^T = \\ &= [p_1, p_2, p_4] \cdot [x, y, 1]^T = \\ &= H_0 \cdot [x, y, 1]^T. \end{aligned} \tag{11}$$

将该截面中心点的像记为 $x_c = [x_c, y_c, 1]^T$, 则有:

$$s_0 x_c = H_0 \cdot [0, 0, 1]^T = p_4, \tag{12}$$

截面上任意点 $[\rho \cos \vartheta, \rho \sin \vartheta, 1]^T$ 的像为:

$$\begin{aligned} x_\vartheta &= [x_\vartheta, y_\vartheta, 1]^T = \\ &= H_0 \cdot [\rho \cos \vartheta, \rho \sin \vartheta, 1]^T = \\ &= \rho \cos \vartheta p_1 + \rho \sin \vartheta p_2 + s_0 x_c, \end{aligned} \tag{13}$$

由上式可得:

$$s_0 = \frac{(p_{21} x_\vartheta - p_{11} y_\vartheta) \cos \vartheta + (p_{22} x_\vartheta - p_{12} y_\vartheta) \sin \vartheta}{y_\vartheta x_c - x_\vartheta y_c} \rho, \tag{14}$$

对于摄像机中心 T , 有: $p_4 = -KRT$, 代入式(10)可得:

$$T = -sR^T K^{-1} x_c. \tag{15}$$

由式(13)、(14)可知,世界坐标系原点与摄像机中心之间距离的确定线性依赖于回转体底面半径 ρ 。因此,如果回转体实际半径未知时,通常将半径 ρ 假定为 1, 进而通过图像计算其他参数。

5 实验研究

5.1 内参数标定实验

针对图 1 所示图像进行实验研究。该照片采

用柯达 M1063 数码相机进行拍摄,相机参数如下:

图像尺寸:1024 pixel×768 pixel

水平分辨率:480 dpi

垂直分辨率:480 dpi

拍摄焦距:13.7 mm

传感器尺寸:8.8 mm×6.6 mm

基于图像边缘提取和曲线拟和方法获取 4 个截面椭圆图像,椭圆参数如表 1 所示。

表 1 从图像中提取的截面椭圆参数
Tab.1 Extracted parameters of ellipses

	r_x/pixel	r_y/pixel	θ/rad	x_0/pixel	y_0/pixel
C_1	151.81	113.99	-0.04	373.46	199.32
C_2	84.00	51.09	-0.04	388.89	443.36
C_1'	27.60	100.58	1.11	779.90	679.89
C_2'	58.41	140.76	1.11	615.39	355.86

由表 1 中的参数确定的椭圆方程为:

$$\left[\frac{(x-x_0)\cos\theta+(y-y_0)\sin\theta}{r_x} \right]^2 + \left[\frac{-(x-x_0)\sin\theta+(y-y_0)\cos\theta}{r_y} \right]^2 = 1, \quad (16)$$

将 C_1, C_2 椭圆参数代入上述方程,并进行方程联立可以求解,两椭圆的 4 个交点的齐次坐标:

$$\mathbf{x}_1 = [376.50 - 129.25i, 349.15 - 0.77i, 1]^T,$$

$$\mathbf{x}_2 = [376.50 + 129.25i, 349.15 + 0.77i, 1]^T,$$

$$\mathbf{x}_3 = [-96.15 - 1536.59i, 1349.36 - 378.07i, 1]^T,$$

$$\mathbf{x}_4 = [-96.15 + 1536.59i, 1349.36 + 378.07i, 1]^T.$$

根据遮挡关系,可以判断, $\mathbf{x}_3, \mathbf{x}_4$ 为圆环点的像,记: $\mathbf{x}_3 = \mathbf{i}, \mathbf{x}_4 = \mathbf{j}$, 则:

$$\mathbf{l}_s = [-0.28 \times 10^{-2}, 0.22 \times 10^{-3}, 1]^T$$

$$\mathbf{l}_\infty = \mathbf{x}_3 \times \mathbf{x}_4 = [0.18 \times 10^{-3}, -0.72 \times 10^{-3}, 1]^T$$

$$\mathbf{v}_\infty = (\mathbf{x}_1 \times \mathbf{x}_2) \times (\mathbf{x}_3 \times \mathbf{x}_4) = [-4269.31, 321.25, 1]^T$$

同理可求通过椭圆 C_1', C_2' 建立约束,求解约束方程组可得:

$$\boldsymbol{\omega} = \begin{bmatrix} 0.39 \times 10^{-6} & -0.14 \times 10^{-8} & -0.24 \times 10^{-3} \\ -0.14 \times 10^{-8} & 0.40 \times 10^{-6} & -0.14 \times 10^{-3} \\ -0.24 \times 10^{-3} & -0.14 \times 10^{-3} & 1.20 \end{bmatrix}.$$

对 $\boldsymbol{\omega}$ 进行 Cholesky 分解,并换算成相机参数如表 2 所示:

表 2 内部参数标定结果

Tab.2 Results of calibrated intrinsic parameters

方法	α	β	γ	u_0	v_0
本文方法	1587.3	1584.5	-5.6	611.2	344.7
张氏标定	1591.5	1592.0	-5.2	612.0	348.5
理论参数	1593.0	1593.0	0.0	612.0	348.0

实验结果表明,采用本文方法焦距标定精度优于 0.36%,主点标定精度优于 0.96%,略逊于张氏标定精度。本算法的优势在于不需要标定模板,充分利用被测对象自身约束关系,通过单幅回转体图像实现相机系统的内参数自动标定。

5.2 外参数标定实验

为了验证本文方法的外参数标定性能,在一个已进行外部参数标定的实验台上进行测量,系统的实际外部参数如表 1 所示。

任取回转轴 \mathbf{l}_s 的两点 (380.0, 348.0, 1), (390.0, 477.3, 1) 由 $\overline{O_c \mathbf{p}_1} = \mathbf{K}^{-1} \mathbf{p}_1, \overline{O_c \mathbf{p}_2} = \mathbf{K}^{-1} \mathbf{p}_2$, 可求得:

$$\mathbf{n}_y = \frac{\overline{O_c \mathbf{p}_1} \times \overline{O_c \mathbf{p}_2}}{|\overline{O_c \mathbf{p}_1} \times \overline{O_c \mathbf{p}_2}|} = [-0.144 \quad 0.002 \quad 0.990]^T$$

$$\mathbf{n}_z = \frac{\mathbf{K}^{-1} \mathbf{v}_\infty \times \mathbf{K}^{-1} (\mathbf{l}_s \times \mathbf{l}_\infty)}{|\mathbf{K}^{-1} \mathbf{v}_\infty \times \mathbf{K}^{-1} (\mathbf{l}_s \times \mathbf{l}_\infty)|} = [-0.194, 0.7872, -0.585]^T$$

进一步可确定:

$$\mathbf{n}_x = \frac{\mathbf{n}_y \times \mathbf{n}_z}{|\mathbf{n}_y \times \mathbf{n}_z|} = [-0.934 \quad -0.331 \quad -0.135]^T,$$

取 $\vartheta=0, \rho=1$, 计算外部参数如表 3 所示。

表 3 外部参数标定结果

Tab.3 Results of calibrated extrinsic parameters

方法	θ_x /rad	θ_y /rad	θ_z /rad	T_x /mm	T_y /mm	T_z /mm
本文方法	2.21	-0.19	-2.99	12.3	0	0
真实参数	2.24	-0.18	-3.00	670.0	0	0

经实际测量,截面 C_1 半径 $\rho=55$ mm,则折算后测量系统平移向量为: $\mathbf{T} = [676.5 \quad 0 \quad 0]^T$, 方

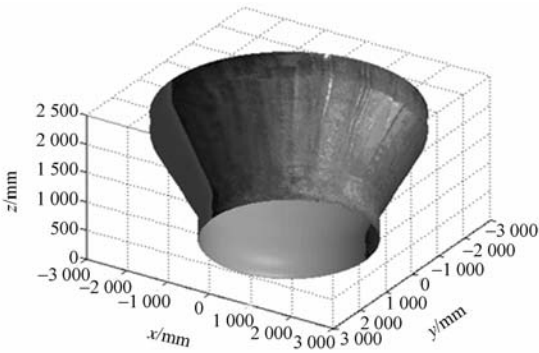


图 5 三维重建结果

Fig. 5 Result of 3D reconstruction

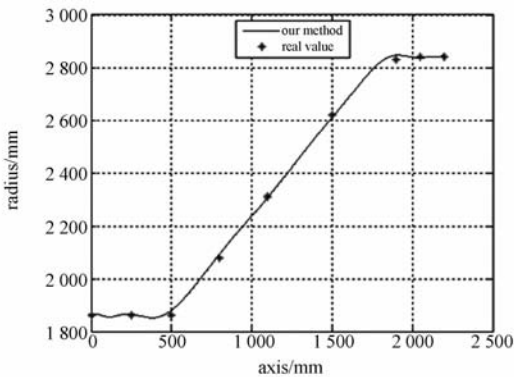


图 6 沿轴向的半径测量精度

Fig. 6 Measurement accuracy of reconstruction radius along axis

向角外参数标定精度优于 5.6%，平移外参数标定精度优于 1%。

将本文方法用于某回转类锻件三维尺寸测量,被测锻件三维重建结果如图 5 所示。将本文方法与接触式半径测量进行对比,结果如图 6 所示。图 6 表明,利用本文方法进行锻件半径测量误差不超过 ± 20 mm,满足工程需要。

6 结 论

本文研究了一种用于回转体形貌测量的摄像机内、外参数自标定的简单有效的标定方法。该方法充分考虑了回转截面的约束特性,利用截面圆环点约束和极线约束构建内参数约束方程,并

通过求解约束方程实现了测量系统内参数的标定。另外,利用回转轴成像特性建立外参数约束方程,实现了系统外部参数的标定。实验结果表明,利用本文方法进行相机内参数标定的精度优于 0.95%,外参数标定精度优于 5.6%,能够满足工程实际需要。

参考文献:

- [1] 张素梅. 基于图像的旋转体文物重建系统的研究与实现[D]. 济南:山东大学,2010.
ZHANG S M. A reconstruction system for archaeological revolution based on images [D]. Jinan: Shandong University, 2010. (in Chinese)
- [2] ABDEL-AZIZ Y I, KARARA H M. Direct linear transformation from comparator coordinates into object space coordinates[C]. *ASP Symposium on Colse-range Photogrammetry*, 1971:1-18.
- [3] TSAI R. An efficient and accurate camera calibration technique for 3D machine vision [C]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1986;364-374.
- [4] ZHANG Z Y. Flexible camera calibration by viewing a plane from unknown orientation [C]. *Proceedings of the International Conference of Computer Vision, Kerkyra, Greece*, 1999:666-673.
- [5] GAUGERAS O. What can be seen in three dimensions with an uncalibrated stereo[C]. *Proceedings of the European Conference on Computer Vision, Santa Margherita Ligure, Italy*, 1992:563-578.
- [6] TRIGGS B. Autocalibration and the absolute quadric [C]. *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, San Juan, Puerto Eico, IEEE computer society*, 1997: 609-614.
- [7] POLLEFEYS M, VAN GOOL L. A stratified approach to metric self calibration [C]. *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, San Juan, Puerto Eico, IEEE computer society*, 1997:407-412.
- [8] 孙军华,吴子彦,刘谦哲,等. 大视场双目视觉传感器的现场标定[J]. *光学 精密工程*, 2009, 17(3): 633-640.
SUN J H, WU Z Y, LIU Q ZH, et al.. Field calibration of stereo vision sensor with large FOV [J].

- Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(3):633-640. (in Chinese)
- [9] 潘淑杰,董守平,王红丽. 应用灭点标定的立体视觉自由曲面三维重建[J]. *光学精密工程*, 2009, 17(5):1128-1133.
- PAN SH J, DONG SH P, WANG H L. Three dimensional reconstruction of stereo vision free-form surface based on vanishing-point calibration [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(5):1128-1133. (in Chinese)
- [10] 李喆,丁振良,袁峰. 基于共面点的多视觉测量系统的全局标定[J]. *光学精密工程*, 2008, 16(3):467-472.
- LI ZH, DING ZH L, YUAN F. Global calibration method for multi-vision measurement system with coplanar targets [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 16(3):467-472. (in Chinese)
- [11] 霍炬,杨卫,杨明. 基于消隐点几何特性的摄像机自标定方法[J]. *光学学报*, 2010, 30(2):465-472.
- HUO J, YANG W, YANG M. A self-calibration technique based on the geometry property of the vanish point [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, 30(2):465-472. (in Chinese)
- [12] WU Y H, LI X J, WU F CH, *et al.*. Coplanar circles, quasi-affine invariance and calibration [J]. *Image and Vision Computing*, 2006, 24: 319-326.
- [13] WU F C, LI H, HU Z Y. New active vision based camera self-calibration technique [J]. *Acta automatica Sinica*, 2001, 27(6):252-262.
- [14] TARDIF J P, SUTRM P. Calibration of cameras with radially symmetric distortion; pattern analysis and machine intelligence [J]. *IEEE Transactions*, 2009, 31(9):1552-1566.
- [15] 刘泉,苏杭. 圆心不对称投影修正的相机标定[J]. *光学精密工程*, 2009, 17(12):3103-3108.
- LIU Q, SU H. Camera calibration based on correction of asymmetric circle center projection [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(12):3103-3108. (In Chinese)
- [16] CARLO C, ALBERTO D B. Metric 3D reconstruction and texture acquisition of surfaces of revolution from a single uncalibrated view [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2005, 27(1):99-114.
- [17] MIYAGAWA I, ARAI H, KOIKE H. Simple camera calibration from a single image using five points on two orthogonal 1-D objects; image processing [J]. *IEEE Transactions*, 2010, 19(6):1528-1538

作者简介:



李雅倩(1982—),女,湖南岳阳人,博士,讲师,2003年、2006年于燕山大学分别获学士、硕士学位,2010年于法国鲁昂国立应用科学学院获博士学位,主要从事辅助驾驶、立体视觉及模式识别等方面的研究。E-mail: yaqian.li@ysu.edu.cn



林洪彬(1979—),男,河北秦皇岛人,讲师,博士研究生,2003年、2005年于燕山大学分别获学士、硕士学位,主要从事现代信号处理、视觉检测技术等方面的研究。E-mail: honphin@ysu.edu.cn