

doi:10.3788/gzxb20184707.0715001

# 基于高阶奇次多项式模型的红外超广角 图像中心标定

刘秉琦, 陈一超, 黄富瑜

(陆军工程大学 石家庄校区 电子与光学工程系, 石家庄 050003)

**摘 要:** 针对红外超广角系统成像畸变大、衍射明显, 传统标定方法精度不高的问题, 提出了一种基于高阶奇次多项式模型的红外超广角图像中心标定方法。以超广角镜头高阶奇次多项式模型为基础, 对微小圆形目标成像的径向与切向放大率进行分析, 设计了标定方法。利用椭圆方程对目标成像进行拟合, 然后以椭圆长短轴比值作为目标函数进行二维高斯曲面拟合, 最终将高斯曲面中心作为畸变中心。实验结果表明, 本文提出的红外超广角图像中心标定方法对实验畸变图像纵横方向的标定精度分别为 0.77 pixels、1.02 pixels, 并以此标定结果对畸变图像进行校正, 校正图像中直线最大均方根误差为 1.56 pixels。实验验证了本文提出的红外超广角图像中心标定方法的准确性, 能够满足红外超广角图像畸变中心标定要求。

**关键词:** 机器视觉; 中心标定; 高阶奇次多项式模型; 红外超广角图像

**中图分类号:** TP391

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1004-4213(2018)07-0715001-7

## Infrared Ultra-wide Angle Image Distortion Centre Calibration Method Based on High Odd-order Polynomial Model

LIU Bing-qi, CHEN Yi-chao, HUANG Fu-yu

(The Army Engineering University of PLA Shijiazhuang Campus, Ordnance Engineering College,  
Shijiazhuang 050003, China)

**Abstract:** Due to the image distortion of the infrared ultra-wide angle system is large, the diffraction is obvious and the precision of traditional calibration method is not high, this article puts forward a kind of infrared ultra-wide angle image distortion centre calibration method based on the high odd-order polynomial model. The calibration method is designed by analyzing the radial and the tangential magnification of the small circular target. The ellipse equation is used to fit the target image, then two dimensional Gauss surface fitting is based on the ratio of the elliptical long and short axis as the objective function. Finally, the center of Gauss surface is regarded as the centre of distortion. The experimental results show that the calibration accuracy of the proposed method are 0.77 pixels and 1.02 pixels respectively. The distorted image is corrected by this calibration result. In the corrected image, the maximum root-mean-square-error of the line is 1.56 pixels. The experiment verifies the accuracy of the proposed infrared ultra-wide angle image center calibration method, which meets the requirements of the infrared ultra-wide angle image distortion center calibration.

**Key words:** Machine vision; Centre calibration; High odd-order polynomial model; Infrared ultra-wide angle image

**OCIS Codes:** 150.0155; 150.1488; 110.3038; 040.1490

基金项目: 河北省自然科学基金(No.F2016506014)资助

第一作者: 刘秉琦(1962—), 男, 教授, 博士, 主要研究方向为光电对抗和光电检测. Email: whelmmail@sina.com

通讯作者: 黄富瑜(1985—), 男, 讲师, 博士, 主要研究方向为光学设计和红外技术. Email: hfyoitics@163.com

收稿日期: 2018-01-22; 录用日期: 2018-04-10

<http://www.photon.ac.cn>

## 0 引言

红外超广角成像系统不受光照强度影响、穿霾透雾本领大,能够获取大视场空域信息,具备复杂条件下全天候工作的能力,因此在机器视觉、车辆自动驾驶以及军用监视等领域具有重要作用<sup>[1-3]</sup>.由于装配误差等因素影响,超广角图像畸变中心一般并不与图像中心点重合<sup>[4]</sup>.

针对可见光超广角图像畸变中心标定问题,文献[5]提出边缘圆形拟合法,该方法要求成像面小于探测器平面,但由于红外超广角图像存在衍射等因素,造成边缘成像模糊,因此该方法适用性窄,标定精度不高.文献[6-7]利用高精度三维棋盘格式标定物提出了一种基于消隐点的中心标定方法.该方法具有较高的标定精度,但红外三维标定物制作存在困难,精度难以保证.文献[8]提出了一种基于对称性的中心标定方法.这种方法原理简单,需事先将镜头光轴垂直于标定物面,但平面标定板难以覆盖整个视场范围,容易陷入局部最优解.此外,红外相机标定成熟方案不多,多集中于利用不同材质靶板法实现对红外小视场相机标定<sup>[9]</sup>,成像效果并不十分理想<sup>[10]</sup>,图像角点的准确提取则更为困难,标定精度较低.

为解决红外超广角畸变图像中心标定问题,本文提出了一种基于高阶奇次多项式模型的红外超广角图像中心标定方法.首先,采用高阶奇次多项式模型描述红外超广角镜头成像特性,并以此模型研究圆形标定物的成像特征.然后,实验采用调整红外超广角相机光轴指向的方法,实现固定的球体标定物在相机超大视场范围内成像,避免复杂三维模板的制作.利用椭圆方程对目标成像边缘进行拟合,并求取不同入射角时椭圆长短轴比值.最后对成像椭圆长短轴比值进行高斯曲面拟合,求得成像椭圆趋于圆形时的坐标,提高了标定精度.

## 1 高阶奇次多项式模型

超广角镜头利用“非相似”成像原理对物空间进行变形压缩.“非相似”成像包括等距投影、等立体角投影、体视投影以及正交投影四种方式<sup>[11]</sup>,成像公式为

$$y = f\omega \quad (1)$$

$$y = 2f \sin(\omega/2) \quad (2)$$

$$y = 2f \tan(\omega/2) \quad (3)$$

$$y = f \sin \omega \quad (4)$$

式中, $y$ 为理想像高, $\omega$ 为入射角.

超广角镜头设计并不严格遵循式(1)~(4),在实际成像中还包括径向、切向等多种畸变.而较多畸变参数的引入对于模型精度的提高并不明显,且容易造成解得不稳定性.其中,仅考虑径向畸变的5参数高阶奇次多项式模型针对四种“非相似”投影方式具有较小的拟合误差,是一种能够较为精确描述超广角镜头成像的一种通用模型<sup>[12]</sup>,即

$$y = k_1\omega + k_2\omega^3 + k_3\omega^5 + k_4\omega^7 + k_5\omega^9 \quad (5)$$

式中, $k_1, k_2, k_3, k_4, k_5$ 为镜头内参数,对特定镜头其为常数.

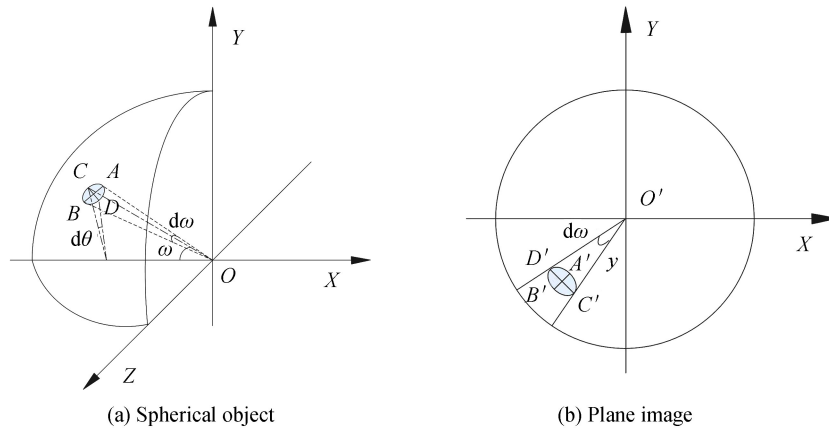


图1 球面物与平面像的对应关系

Fig.1 Correspondence between spherical object and plane image

根据径向、切向放大率概念,分析“非相似”原理物像关系.如图 1 所示,对于距离镜头主点距离为  $r$  的微小圆形,其径向放大率  $\beta_r(A'B'/AB)$  及切向放大率  $\beta_t(C'D'/CD)$  为

$$\beta_r = \frac{dy}{r d\omega} \quad (6)$$

$$\beta_t = \frac{y d\theta}{r \sin \omega d\theta} \quad (7)$$

将式(5)及其微分形式带入式(6)、(7),则

$$\beta_r = \frac{k_1 + 3k_2\omega^2 + 5k_3\omega^4 + 7k_4\omega^6 + 9k_5\omega^8}{r} \quad (8)$$

$$\beta_t = \frac{k_1\omega + k_2\omega^3 + k_3\omega^5 + k_4\omega^7 + k_5\omega^9}{r \sin \omega} \quad (9)$$

比较式(8)和式(9)可得

$$\beta_t/\beta_r = \frac{k_1\omega + k_2\omega^3 + k_3\omega^5 + k_4\omega^7 + k_5\omega^9}{\sin \omega (k_1 + 3k_2\omega^2 + 5k_3\omega^4 + 7k_4\omega^6 + 9k_5\omega^8)} \quad (10)$$

由式(10)可知,球形物面上的微小圆形成像椭圆长短轴的比值只与入射角相关,且当  $\omega = 0$  时,  $\beta_t/\beta_r = 1$ ,此时成像椭圆变成圆形,除较为少见的体视投影成像方式外,其他三种投影方式中入射角越大则成像椭圆越扁,圆形成像点即对应于成像畸变中心.

## 2 标定方法

### 2.1 标定流程

根据标定原理,设计如图 2 所示的标定方法.图 2 中, $O$  为镜头主点, $X$ 、 $Y$ 、 $Z$  为正交直角坐标系, $S$  为球形物面上的球体目标物, $S$  到  $O$  点距离为  $r$ ,曲面  $C$  为以  $O$  点为球心, $o-uv$  为探测器坐标系, $s$  为目标  $S$  成像椭圆.以  $O$  点为中心调整成像系统光轴指向,可以视为固定球体目标  $S$  相对于成像系统在球形成像面上以不同角度入射成像.

成像系统调整光轴的方法通过一维标定物就可以实现全视场覆盖,大大简化了实验条件;球体目标具有高度对称性,在任意角度都能够以圆面入射,可以避免圆形目标因倾角不同导致的成像差异;光轴调整中心与镜头主点不能完全重合,但成像入射距离的偏差量远小于  $r$  (约 2 m),因此不同入射角的入射距离相等;同时,相较于普通靶板,镜头焦距调整为无穷远时,标定物能够清晰,避免因实际使用中调焦而导致中心产生偏移.

根据分析,提出的中心标定方法标定流程为:

1) 固定球体标志物,设置与其成像灰度差异较大的目标作为背景,对超广角成像系统成像中心进行估算,尽量与光轴指向调整中心点重合.

2) 调整成像系统光轴指向,采集球体标定物不同入射角度时的成像用于后续标定,同时控制成像椭圆在全视场内较为均匀分布.

3) 提取不同入射角度图像中成像椭圆边缘,根据成像椭圆坐标,利用椭圆方程进行拟合,求取拟合椭圆中心点坐标以及长短轴比值.

4) 以拟合椭圆中心坐标为横纵坐标、长短轴比值为竖坐标,采用高斯曲面拟合法对数据进行拟合,该高斯函数最小值趋于 1 时的坐标对应成像椭圆趋于圆形,即为畸变中心坐标.

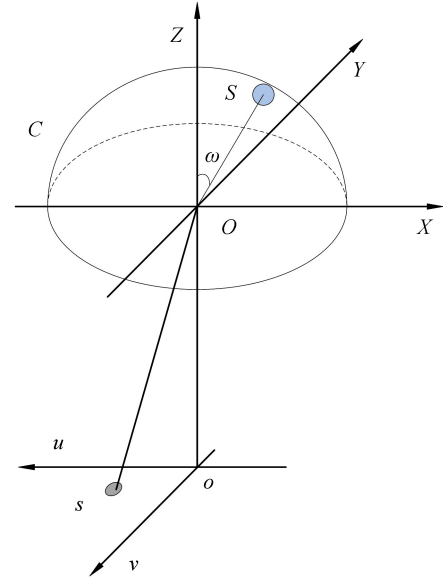


图 2 标定方法

Fig.2 Calibration method

5)按步骤 2)、3)和 4),多次标定取平均值.

## 2.2 椭圆拟合

椭圆一般方程可以表示为<sup>[13]</sup>

$$Ax^2 + Bxy + Cy^2 + Dx + Ey + 1 = 0 \quad (11)$$

设单成像椭圆边缘检测后得到  $M$  个离散点坐标  $(u_i, v_i)$ , 使离散点的方程和  $S$  最小, 即式(12)取最小值

$$S(A, B, C, D, E) = \sum_{i=1}^M [Au_i^2 + Buv + Cv_i^2 + Du_i + Ev_i + 1]^2 \quad (12)$$

运用最小二乘原理确定方程系数, 解得椭圆参数. 则第  $j$  个椭圆中心  $(u_{j0}, v_{j0})$  坐标为

$$\begin{cases} u_{j0} = \frac{BE - 2CD}{4AC - B^2} \\ v_{j0} = \frac{BD - 2AE}{4AC - B^2} \end{cases} \quad (13)$$

椭圆长轴  $b$ 、短轴  $a$  为

$$\begin{cases} a = \frac{2(Au_{j0}^2 + Cv_{j0}^2 + Bu_{j0}v_{j0} - 1)}{A + C - \sqrt{(A - C)^2 + B^2}} \\ b = \frac{2(Au_{j0}^2 + Cv_{j0}^2 + Bu_{j0}v_{j0} - 1)}{A + C + \sqrt{(A - C)^2 + B^2}} \end{cases} \quad (14)$$

## 2.3 高斯曲面拟合

对于幅值为  $G$ , 纵横方向标准差为  $\sigma_u^2, \sigma_v^2$ , 顶点坐标为  $(u_o, v_o)$  的二维高斯函数<sup>[14]</sup>可表示为

$$f(u, v) = G \cdot \exp \left[ -\frac{(u - u_o)^2}{2\sigma_u^2} - \frac{(v - v_o)^2}{2\sigma_v^2} \right] \quad (15)$$

对式(15)两边取对数得

$$f \cdot \ln f = \left( \ln G - \frac{u_o^2}{2\sigma_u^2} - \frac{v_o^2}{2\sigma_v^2} \right) \cdot f + \frac{u_o}{\sigma_u^2} (uf) + \frac{v_o}{\sigma_v^2} (vf) - \frac{1}{2\sigma_u^2} (u^2 f) - \frac{1}{2\sigma_v^2} (v^2 f) \quad (16)$$

$N$  个拟合椭圆纵横坐标、长短轴比值分别以  $u_{j0}, v_{j0}, f_j$  表示,  $j = 1, 2, \dots, N$ , 带入式(16), 得到参数方程组并以矩阵形式给出

$$\mathbf{H} = \mathbf{K}\mathbf{L} \quad (17)$$

式中,  $\mathbf{H}$  为  $N \times 1$  向量, 其中第  $j$  个元素为  $h_j = f_j \cdot \ln f_j$ , ( $j = 1, 2, \dots, N$ );  $\mathbf{K}$  为  $N \times 5$  矩阵, 其中第  $j$  行元素为  $\mathbf{k}_j = [f_j, f_j u_{j0}, f_j v_{j0}, f_j x_j^2, f_j y_j^2]$ , ( $j = 1, 2, \dots, N$ );  $\mathbf{L}$  为参数向量,  $\mathbf{L} = [\ln G - \frac{u_{j0}^2}{2\sigma_u^2} - \frac{v_{j0}^2}{2\sigma_v^2}, \frac{u_{j0}}{\sigma_u^2}, \frac{v_{j0}}{\sigma_v^2}, -\frac{1}{2\sigma_u^2}, -\frac{1}{2\sigma_v^2}]$ .

由式(17)得到椭圆数据点误差的列向量  $\mathbf{E}$  为

$$\mathbf{E} = \mathbf{H} - \mathbf{K}\mathbf{L} \quad (18)$$

则  $N$  个数据的均方根误差可表示为

$$\text{MSE} = \frac{1}{N} \|\mathbf{E}\|^2 = \frac{1}{N} \mathbf{E}^T \mathbf{E} \quad (19)$$

将数据带入, 并利用最小二乘法求式(19)最小值时参数向量的值, 从而解出顶点坐标  $(u_o, v_o)$ .

## 3 实验结果及分析

### 3.1 中心标定实验

实验利用如图 3 所示视场约为  $170^\circ \times 130^\circ$  的红外超广角成像系统开展, 成像系统能够通过电动三维旋转台调整光轴指向, 标定球直径及像距离约为 24.5 cm、1.8 m. 图 4 为标定球以不同角度入射时的成像, 可以看出红外超广角成像系统能够获取大视场空域信息, 且图像存在明显畸变, 同时图像视场边界较为模糊, 准确提取视场边界存在较大误差; 实验采用目标遮挡热辐射板法, 球体边缘清晰并与背景红外特征显著区分; 球体目标成像较小, 可以用椭圆方程进行较为精确的拟合.

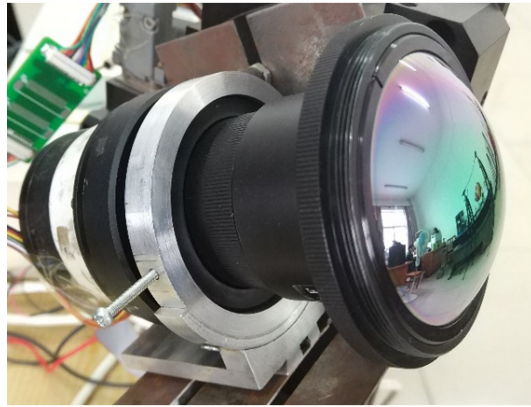


图3 红外超广角成像系统  
Fig.3 Infrared ultra-wide angle image system

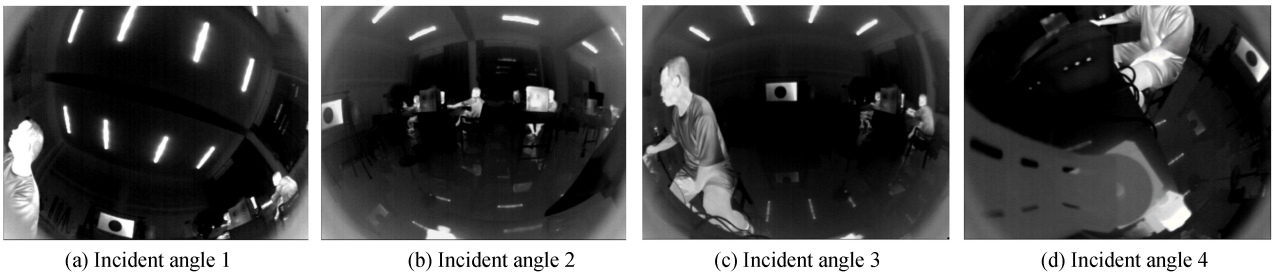


图4 目标不同入射角图像  
Fig.4 Ultra-wide angle infrared aim images with different incident angle

实验中,通过旋转调整成像系统光轴指向法采集球体目标不同入射角处的成像,并进行椭圆拟合,求出椭圆中心点坐标,叠加到单幅图像中,如图5所示.由图5可以看出,本方法实现了标定物全视场范围内成像,图像中心区域入射角较小,成像椭圆越接近圆形,边缘区域入射角较大,成像椭圆越扁,与第一节分析结果一致.以椭圆中心点坐标为  $x$ 、 $y$  轴坐标、长短轴比值为  $z$  轴坐标建立三维坐标,如图6所示.利用高斯曲面拟合法对图6进行曲面拟合,如图7所示,高斯曲面顶点趋近于1,畸变最小,即为图像畸变中心点.根据本文方法,对于分辨率为  $755 \times$

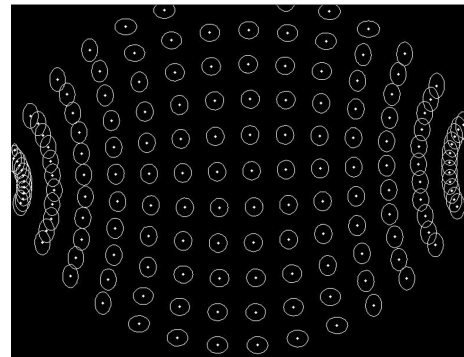


图5 成像椭圆拟合结果  
Fig.5 Fitting result of imaging ellipse

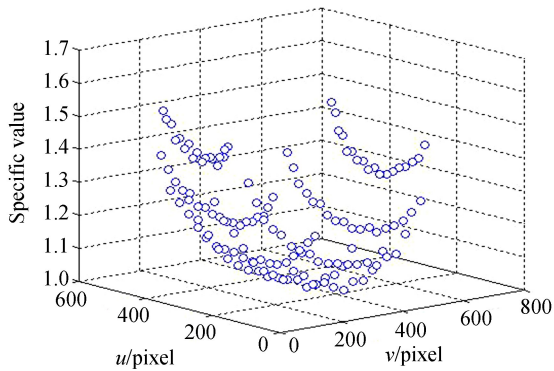


图6 成像椭圆长短轴比值  
Fig.6 Long axis to short axis ratio of imaging ellipse

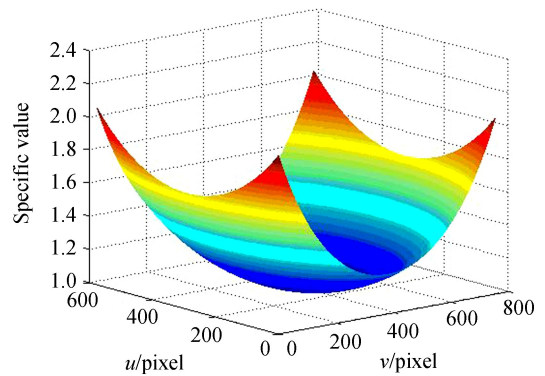


图7 高斯曲面拟合  
Fig.7 Gauss surface fitting

575 的红外超广角图像,经过多组实验测定,畸变中心标定结果为 $(382.93 \pm 0.77, 292.65 \pm 1.02)$ .测定结果较为接近图像中心 $(377.5, 287.5)$ ,与实际观察结果相符.

### 3.2 精度分析

文献[15]指出,利用靶板法对可见光鱼镜头畸变中心标定的精度为 0.5 pixels,考虑到红外更为明显的衍射效应,1 个数量级的像素误差是较高的标定精度.

根据本文中心标定结果,结合镜头焦距参数及成像方式,对如图 8(a)所示的畸变图像中的曲线(实际空间中为直线)进行校正,得到的结果如图 8(b)所示,并计算其中直线  $a$ 、 $b$ 、 $c$ 、 $d$ 、 $e$ 、 $f$  的拟合直线均方根误差(Root Mean Square Error, RMSE)如表 1 所示,且其值越小直线度越高.从表 1 可以看出, RMSE 介于 0.72~1.56 pixels 之间,直线具有较高的还原度,说明本文的标定结果是可靠的.

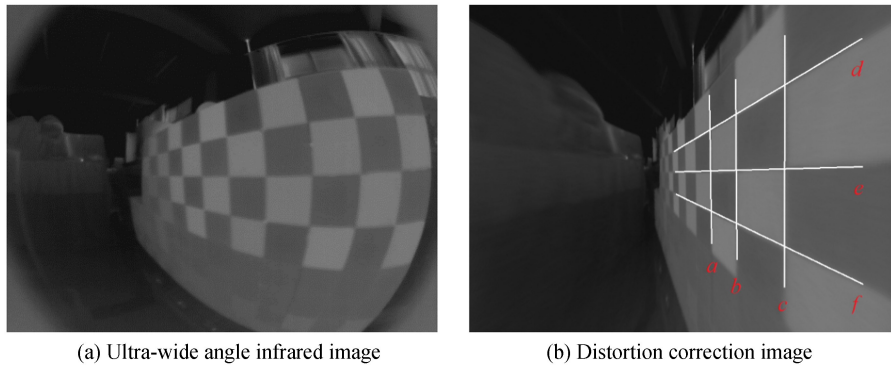


图 8 畸变校正

Fig.8 Distortion correction

表 1 均方根误差  
Table 1 RMSE

$a$	$b$	$c$	$d$	$e$	$f$
0.81	0.72	1.26	1.56	1.15	0.92

分析可知,标定误差来源主要有三个方面.一是理论误差,式(5)高阶奇次多项式模型描述超广角镜头成像忽略了非对称部分,实际上仍然存在一定的偏差量<sup>[12,16]</sup>.二是像差及衍射效应影响,点目标超广角系统成像呈弥散斑,而非理想几何点,且越靠近边缘像差越大;同时,长波红外对应波段为 8~14  $\mu\text{m}$ ,在超广角成像系统中其 Airy 斑直径(34.16  $\mu\text{m}$ )一般大于长波红外探测器单像素(17  $\mu\text{m}$ 、25  $\mu\text{m}$ 、30  $\mu\text{m}$ )尺寸.超广角镜头较大的像差以及长波红外明显的衍射效应会导致目标成像边界模糊,从而造成边缘提取误差.三是算法拟合误差,算法拟合误差是影响标定精度的重要因素.计算图 5 中单椭圆拟合误差,结果如图 9 所示:入射角越大拟合误差越大,反之则越小;中心区域椭圆拟合误差约为 0.01 pixels,边缘最大误差约为 0.1 pixels.

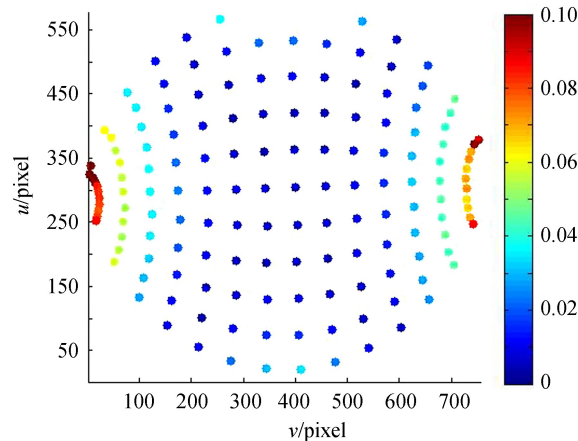


图 9 椭圆拟合误差

Fig.9 Ellipse fitting error

## 4 结论

对红外超广角图像畸变中心标定相关问题进行了研究,结合“非相似”成像原理和红外成像特点,提出了一种基于高阶奇次多项式模型的超广角图像畸变中心标定方法,并给出实现本标定方法的理论以及拟合算法.实验结果表明,本文提出的畸变中心标定方法可以有效简化标定条件,标定精度较好,横纵坐标方向的标定精度分别为 0.77 pixels、1.02 pixels.所提方法在标定过程中,通过调整光轴指向的方法实现全视场成像,克服了平面靶板局部成像容易陷入局部最优解问题,同时又避免了三维靶板繁琐的制作过程,具有良好的适用范围,满足红外超广角以及超广角成像系统图像畸变中心标定的需求.

### 参考文献

- [1] MAIK A, RAINER S. How to consider emotional reactions of the driver within the development of Advanced Driver Assistance System[J]. *Procedia CIRP*, 2014, **21**: 70-74.
- [2] STEFFEN U, JENS L, STEFAN H. Improved wide-angle, fisheye and omnidirectional camera calibration[J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2015, **108**(1): 72-79.
- [3] HYUNGTAE K, JAEHOON J, JOONKI P. Fisheye lens camera based surveillance system for wide field of view monitoring[J]. *Optik-International Journal for Light and Electron Optics*, 2016, **127**(14): 5636-5646.
- [4] FENG Wei-jia, ZHANG Bao-feng, CAO Zuo-liang. Omni-directional vision parameter calibration and rectification based on fish-eye lens[J]. *Journal of Tianjin University*, 2011, **44**(5): 417-424.  
冯为嘉, 张宝峰, 曹作良. 基于超广角镜头的全方位视觉参数标定与畸变矫正[J]. 天津大学学报, 2011, **44**(5): 417-424.
- [5] 石恬. 车载超广角相机自标定研究[D]. 西安:西安电子科技大学, 2015.
- [6] 徐晓波. 超广角摄像机标定及图像特征点匹配方法研究[D]. 北京:北京化工大学, 2013.
- [7] HUGHES C, DENNY P, GLAVIN M, *et al.* Equidistant fish-eye calibration and rectification by vanishing point extraction[J]. *PAMI*, 2010, **32**(12): 2289-2296.
- [8] FUYU H, YONGZHONG W, XUEJU S, *et al.* Method for calibrating the fisheye distortion center[J]. *Applied Optics*, 2012, **51**(34): 8169- 8176.
- [9] VIDAS S, LAKEMOND R, DENMAN S. A mask-based approach for the geometric calibration of thermal-infrared cameras[J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2012, **61**(6): 1625~1635.
- [10] 佟颖. 基于红外与可见光双波段图像的立体视觉关机技术研究[D]. 天津:天津大学, 2015.
- [11] 王永仲. 鱼镜头光学[M]. 北京:科学出版社, 2006: 34-40.
- [12] JUHO K, SAMI S. A generic camera model and calibration method for conventional, wide-angle, and fish-eye lenses [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2006, **28**(8): 1335-1340.
- [13] CHEN Ruo-zhu, SUN Yue. The study of an improved randomized algorithm for detecting ellipses based on least square approach[J]. *Industrial Instrumentation & Automation*, 2017, **2**: 35-46.  
陈若珠, 孙岳. 基于最小二乘法的椭圆拟合改进算法研究[J]. 工业仪表与自动化装置, 2017, **2**: 35-46.
- [14] WANG Min, ZHAO Jin-yu, CHEN Tao. Center extraction method for star-map targets based on anisotropic gaussian surface fitting[J]. *Acta Optica Sinica*, 2017, **37**(5): 0515006.  
王敏, 赵金宇, 陈涛. 基于各向异性高斯曲面拟合的星点质心提取算法[J]. 光学学报, 2017, **37**(5): 0515006.
- [15] STEFFEN U, JENS L, STEFAN H. Improved wide-angle, fisheye and omnidirectional camera calibration [J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2015, **108**(1): 72-79.
- [16] ZHU H, WANG X, ZHOU J, *et al.* Approximate model of fisheye camera based on the optical refraction[J]. *Multimedia Tools and Applications*, 2014, **73**(3): 1445-1457.

**Foundation item:** Hebei Province Natural Science Fund(No.F2016506014)

引用格式:LIU Bing-qi,CHEN Yi-chao,HUANG Fu-yu. Infrared Ultra-wide Angle Image Distortion Centre Calibration Method Based on High Odd-order Polynomial Model[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2018, **47**(7): 0715001

刘秉琦,陈一超,黄富瑜.基于高阶奇次多项式模型的红外超广角图像中心标定[J].光子学报,2018,**47**(7):0715001