

视觉测量红外光点图像中心精确提取

王伟华, 史永敏, 李丹凤, 田信灵, 谭民涛
(中国空间技术研究院 北京控制工程研究所, 北京 100190)

摘要:提出了一种视觉测量中的红外光点图像中心提取方法。首先,使用一组阈值平面与红外光点灰度能量分布相交确定光点能量等高线,得到各等高轮廓点和阈值平面截得的能量包络。然后,利用最小二乘椭圆拟合等高线上轮廓点的椭圆中心,并计算阈值平面所截得的能量包络的质心,以椭圆中心和包络质心的黄金分割点作为等高层面上的光点中心。最后,利用各等高层面上光点的中心获得红外光点图像中心的精确位置。试验验证结果表明,算法对红外光点图像中心提取可取得较高精度。目前,方法已在面阵静态红外地球敏感器标定中得到应用。

关键词:光点中心;视觉测量;阈值平面;能量包络;亚像素

中图分类号:TP751 **文献标识码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.1001-5078.2016.12.014

High precision extraction of infrared light spot center in vision measurement

WANG Wei-hua, SHI Yong-min, LI Dan-feng, TIAN Xin-ling, TAN Min-tao
(Beijing Institute of Control Engineering, Chinese Academy of Space Technology, Beijing 100190, China)

Abstract: An extraction method for center location of infrared light spot image in vision measurement was proposed. Firstly, the contour line of spot gray energy is segmented by the intersection of a group of threshold planes and infrared spot gray level energy distribution. The contour points and energy envelopes of each contour are obtained. Then, by using least square fitting method, the ellipse center of contour points is calculated. The centroid of spot energy envelope which is generated by threshold plane is gotten. The golden section point of ellipse center and envelope centroid is taken as the center of each contour. Finally, infrared light spot center location is extracted by the centers of each contour. Experimental results show that the proposed method has high accuracy for center extraction of infrared light spot image. The method has been used for the calibration of array static infrared earth sensor.

Key words: light spot center; vision measurement; threshold plane; energy envelope; sub-pixel

1 引言

红外光点图像中心提取是视觉测量中常见的一种特征获取方式^[1-5],该类光点可以是激光光点或者红外图像光点等。如何准确地获取红外光点图像中心是该类视觉测量中的一个关键问题。目前,光点图像中心提取方法可分为两大类。一

类是基于边缘的方法,该类方法首先提取光点图像的边缘,再通过边缘点确定光点中心,比较常用的方法有圆及椭圆拟合^[6]、矩方法^[7]等。该类方法适合光点图像边缘比较规则清晰的光点中心提取,一般红外光点受成像质量、低信噪比、噪声及环境因素等影响,使得该类方法使用较受限且无

作者简介:王伟华(1984-),男,硕士,工程师,主要从事空间光学敏感器视觉算法方面的研究等。E-mail:whwang0601@126.com

收稿日期:2016-03-27;**修订日期:**2016-05-02

法实现高精度的提取。另一类是基于灰度的方法,该类方法利用光点图像灰度分布信息计算光点中心。比较常用的方法有灰度重心法、Hessian 矩阵法^[8]和曲面拟合法^[9]。灰度重心法是用的比较多的一种光点中心定位方法,该方法首先需要分割出光点图像区域,抗噪较弱,精度易受影响。曲面拟合法需要光点灰度分布近似曲面形态,在实际应用中,受各种条件影响,光点的灰度分布不一定满足曲面具体数学模型。Hessian 矩阵法利用 Hessian 极大极小值矩阵得到光点中心位置,然后利用二级泰勒展开推出光点中心的亚像素位置。该方法精度较高,鲁棒性较好,但算法实现复杂,需要对图像进行大规模卷积运算,运算量大。一些学者进行了改进,文献[10]证明了空间发光点能量中心透视投影不变性,建立了符合高斯分布的光点图像灰度分布模型。文献[11]使用形态学处理分割出光点图像区域,利用多尺度空间下光点区域的 Hessian 矩阵计算光点中心,过程中高斯卷积核的最优选取是关键。

本文提出一种红外光点图像中心精确提取方法,该方法可不局限于光点灰度能量分布的具体数学模型。首先,根据红外光点灰度能量分布获得各等高平面上轮廓点的椭圆中心和能量包络质心,然后,以各等高平面上椭圆中心和能量包络质心的黄金分割点作为本等高层的光点中心,最后将各等高层光点中心的均值作为红外光点图像中心的精确位置。实验结果表明,该光点图像中心提取方法具有较好的精度和鲁棒性。

2 红外光点图像中心精确提取算法

红外光点图像一般呈中间亮度高,周围亮度低的灰度级分布,如图 1 所示。实际应用中受光学系统、成像波段及使用环境的限制,所呈的光点图像大小、对比度、分布各有不同。

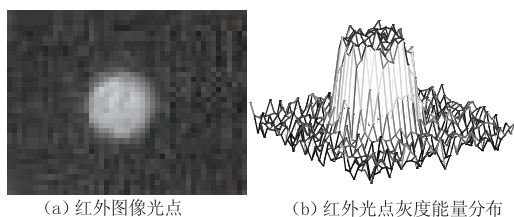


图 1 红外图像光点和灰度能量分布图

Fig.1 Light spot image and energy distribution

红外光点图像灰度能量分布呈锥形,如图 1(b)

所示。为了精确可靠获得红外光点图像中心,光点图像中心的提取集中在对此锥形灰度能量分布分析的基础上,提出一种红外光点图像中心精确提取方法,具体地步骤如下:

步骤 1:对于图 1(b)所示的红外光点灰度能量分布,选取一组阈值平面 V_i ($i = 1, \dots, N$) 去截取,该组阈值平面需位于光点灰度能量分布背景噪声之上和光点顶部之下的中间区域。

步骤 2:该组阈值平面和红外光点灰度能量分布相交,得到一组光点等高轮廓线,提取各等高层的轮廓点进行最小二乘椭圆拟合求取各层椭圆中心。

步骤 3:以每组的轮廓点为基准包含红外光点灰度能量分布的包络,形成一组红外光点能量包络,求取各能量包络质心。

步骤 4:以椭圆中心和包络质心的黄金分割点作为各等高层光点中心,进而获得红外光点图像中心的精确位置坐标。

3 红外光点图像中心精确提取原理

3.1 等高层最小二乘椭圆拟合求解圆心

根据红外光点灰度能量分布的一般形态,设等高层平面上椭圆的一般表达式为:

$$ax^2 + bxy + cy^2 + dx + ey + 1 = 0 \quad (1)$$

等高轮廓上红外光点图像边界点的一组观测值为 $P_i(x_i, y_i)$, $i = 1, \dots, N$ 。

设函数:

$$f(x_i, y_i) = ax_i^2 + bx_iy_i + cy_i^2 + dx_i + ey_i + 1 \quad (2)$$

其中, $i = 1, \dots, N$ 。

根据最小二乘法原理,即寻找一组最佳的参数 (a, b, c, d, e) ,使得函数 f 都尽可能满足式(2)。

为此,构建目标函数:

$$F(a, b, c, d, e) = \sum_{i=1}^N (ax_i^2 + bx_iy_i + cy_i^2 + dx_i + ey_i + 1)^2 \quad (3)$$

根据偏微分学原理,对目标函数中待定椭圆参数的求解可转换成函数 F 的极小值问题:

$$\frac{\partial F}{\partial a} = \frac{\partial F}{\partial b} = \frac{\partial F}{\partial c} = \frac{\partial F}{\partial d} = \frac{\partial F}{\partial e} = 0 \quad (4)$$

由此可得方程组:

$$A \cdot [a \ b \ c \ d \ e]^T = B \quad (5)$$

其中:

$$A = \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^N x_i^4 & \sum_{i=1}^N x_i^3 y_i & \sum_{i=1}^N x_i^2 y_i^2 & \sum_{i=1}^N x_i^3 & \sum_{i=1}^N x_i^2 y_i \\ \sum_{i=1}^N x_i^3 y_i & \sum_{i=1}^N x_i^2 y_i^2 & \sum_{i=1}^N x_i y_i^3 & \sum_{i=1}^N x_i^2 y_i & \sum_{i=1}^N x_i y_i^2 \\ \sum_{i=1}^N x_i^2 y_i^2 & \sum_{i=1}^N x_i y_i^3 & \sum_{i=1}^N y_i^4 & \sum_{i=1}^N x_i y_i^2 & \sum_{i=1}^N y_i^3 \\ \sum_{i=1}^N x_i^3 & \sum_{i=1}^N x_i^2 y_i & \sum_{i=1}^N x_i y_i^2 & \sum_{i=1}^N x_i^2 & \sum_{i=1}^N x_i y_i \\ \sum_{i=1}^N x_i^2 y_i & \sum_{i=1}^N x_i y_i^2 & \sum_{i=1}^N y_i^3 & \sum_{i=1}^N x_i y_i & \sum_{i=1}^N y_i^2 \end{bmatrix}$$

$$B = \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^N x_i^2 & \sum_{i=1}^N x_i y_i & \sum_{i=1}^N y_i^2 & \sum_{i=1}^N x_i & \sum_{i=1}^N y_i \end{bmatrix}^T$$

使用高斯列主元消去法求解方程组,解出参数 (a, b, c, d, e) 。

若 $|A| \neq 0$, 则线性方程组有唯一解。

然后,根据椭圆一般方程,求解出椭圆中心 $E(x_e, y_e)$ 为:

$$\begin{cases} x_e = \frac{be - 2cd}{4ac - b^2} \\ y_e = \frac{bd - 2ae}{4ac - b^2} \end{cases} \quad (6)$$

根据式(5)~式(6)得到各等高层椭圆中心坐标。

实际运算中需要对拟合情况进行判定,利用椭圆方程求解轮廓点到椭圆中心的距离,比较与理论值的差,根据距离差的标准差(STD; Standard Deviation)进行判定,该值小于设定阈值表示此次拟合成功,否则将轮廓点中的离散点进行剔除,然后再进行二次拟合,以确保拟合求解精度。

3.2 等高层能量包络质心计算

对红外光点图像中心的提取,除了需要分析等高轮廓线外,还需关注能量包络的灰度等级分布,为此计算能量包络的质心。若红外光点灰度分布均匀,则质心与经椭圆拟合的中心近重合,否则,包络质心与椭圆中心将产生一定的偏差,本节介绍各层光点能量包络的确定及其质心计算。

红外光点能量包络确定时,利用第2节的一组等高阈值平面截取光点灰度能量分布,选取阈值平面之上的灰度分布作为能量包络。

对每个能量包络,计算该层能量包络的质心,设红外光点灰度分布函数 $g(x_i, y_i)$, 能量包络质心

$M(x_m, y_m)$, 则:

$$\begin{cases} x_m = \frac{\sum_{i=1}^Q g(x_i, y_i) \cdot x_i}{\sum_{i=1}^Q g(x_i, y_i)} \\ y_m = \frac{\sum_{i=1}^Q g(x_i, y_i) \cdot y_i}{\sum_{i=1}^Q g(x_i, y_i)} \end{cases} \quad (7)$$

其中, Q 为轮廓点个数。

这里由于选取了各层能量包络进行计算质心,相比于传统质心法采用灰度阈值分割光点区域,有效克服了边缘规则性和背景噪声对质心计算精度的影响。

3.3 红外光点图像中心的精确定位

设一组阈值平面数量为 N , 经确定的红外光点图像椭圆中心坐标为 $E(x_{ei}, y_{ei})$, $i = 1, \dots, N$, 能量包络质心为 $M(x_{mi}, y_{mi})$, $i = 1, \dots, N$ 。

根据黄金分割原则,每层等高轮廓上对应的红外光点中心为:

$$\begin{cases} x_i = x_{ei} + (x_{mi} - x_{ei}) \cdot (1 - \frac{\sqrt{5} - 1}{2}) \\ y_i = y_{ei} + (y_{mi} - y_{ei}) \cdot (1 - \frac{\sqrt{5} - 1}{2}) \end{cases} \quad (8)$$

其中, $i = 1, \dots, N$ 。

根据公式(8)确定的各等高层面中心,红外光点图像的中心的精确位置为:

$$\begin{cases} x = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i \\ y = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N y_i \end{cases} \quad (i = 1, \dots, N) \quad (9)$$

其中, N 为阈值平面数,即等高轮廓数。

根据式(9)即可确定红外光点图像中心精确位置坐标。

4 试验结果

为了验证提出的红外光点图像中心提取算法的有效性和精度,进行了一系列试验。

在试验中,以项目组研究的阵列式红外地球敏感器为载体,该空间视觉敏感器使用非制冷焦平面红外探测器,成像波段 $14 \sim 16 \mu\text{m}$, 图像尺寸为 $640 \text{ pixel} \times 480 \text{ pixel}$, 采集的红外光点图像如图2所示。

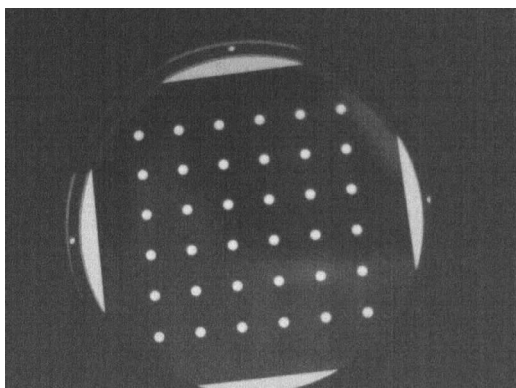


图2 红外光点图像

Fig. 2 Infrared light spot image

图3所示为一组阈值平面与光点灰度能量分布相交,得到等高层轮廓点,经拟合的椭圆方程曲线和光点能量包络如图4、图5所示。

为验证算法中阈值平面数量对光点图像中心计算精度影响,分别选用数量为1~10的一组阈值平面,重复采样50次红外图像,其STD(标准差,Standard-Deviation)如图6(a)所示,从试验结果可见,为达到较好的提取精度,每组的阈值平面应有3个以上。

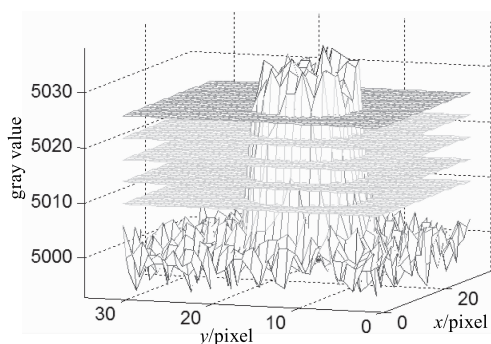


图3 阈值平面图像示意图

Fig. 3 Threshold plane image

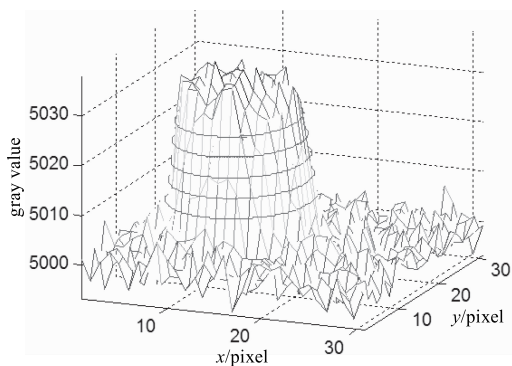


图4 等高层面椭圆拟合

Fig. 4 Ellipse fitting for contour points

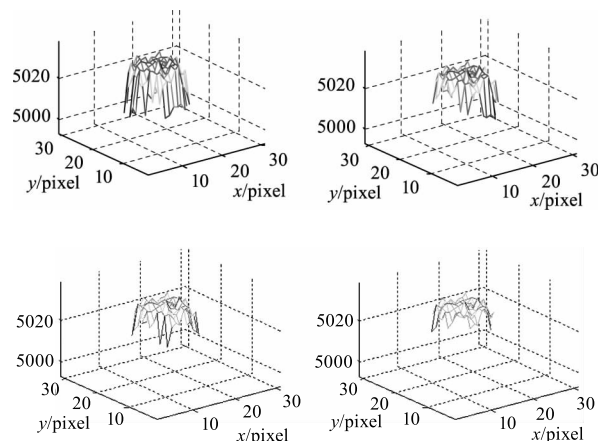
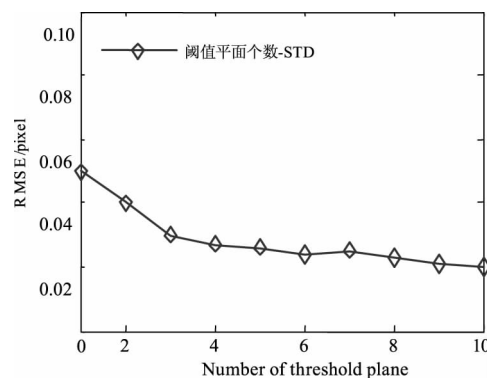


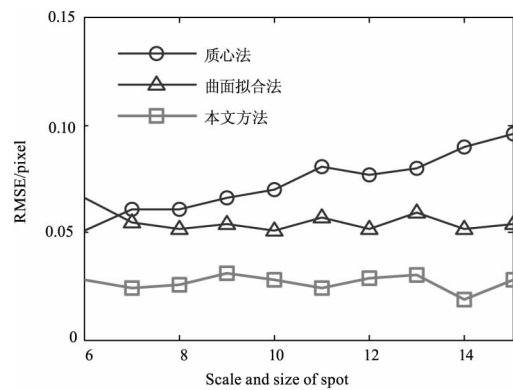
图5 截取的光点能量包络

Fig. 5 Energy envelop of light spot

分别选取光点大小约6~15 pixel的红外光点成像图像,每组的光点重复50次成像,对采集的50幅图像使用自适应阈值的质心法、曲面拟合法和本文算法,计算光点图像中心定位精度。从图6(b)可以看出,文中方法对不同大小的红外光点图像中心的提取精度要高于自适应阈值的质心法和曲面拟合法。本文方法在对14~16 μm 波段低信噪比红外光点图像中心提取中,其标准差优于0.05 pixel。



(a) 阈值平面数量与光点中心的标准差



(b) 三种方法对不同大小光点中心提取的标准差

图6 算法计算精度试验分析

Fig. 6 Experimental analysis of the algorithm accuracy

5 结 论

本文根据视觉测量高精度的要求,提出一种红外光点图像中心提取方法。方法将红外光点图像看成一种灰度能量分布形态,在等高层面求解红外光点图像中心。方法不局限于光点灰度能量分布的具体数学模型。文中从理论上介绍了该方法原理,通过一组阈值平面与光点灰度能量分布相交,获得各等高层上的轮廓点,计算该轮廓点的椭圆中心和能量包络质心,然后通过黄金分割原则确定各子层的中心坐标。最后,根据各等高层光点中心获得红外光点图像中心的精确位置。试验结果证明,本文方法对 14~16 μm 波段红外光点图像中心提取试验中,其标准差优于 0.05 pixel,方法对视觉测量和空间光学敏感器研究中红外光点图像中心的提取有参考意义。

参考文献:

- [1] XU Fengru, LIN Yuchi, ZHAO Meirong, et al. Reticle extraction technology based on visual tracking autocollimator [J]. *Laser & Infrared*, 2011, 41(11): 1211 - 1214. (in Chinese)
徐凤茹, 林玉池, 赵美蓉, 等. 基于视觉跟踪式自准直仪的十字线提取技术[J]. *激光与红外*, 2011, 41(11): 1211 - 1214.
- [2] CHEN Yong, ZHANG Hu, LI Yuan, et al. Research on image processing in scotopic vision based on Open CV [J]. *Laser & Infrared*, 2013, 43(3): 311 - 314. (in Chinese)
陈勇, 张虎, 李愿, 等. 基于 Open CV 的暗视觉图像处理的研究[J]. *激光与红外*, 2013, 43(3): 311 - 314.
- [3] CAO Shikang, LI Dongjian, XU Ruihua, et al. Algorithm of laser spot detection based on optimal arc [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(10): 3492 - 3496. (in Chinese)
曹世康, 李东坚, 许瑞华, 等. 基于最优弧的激光光斑中心检测算法[J]. *红外与激光工程*, 2014, 43(10): 3492 - 3496.
- [4] Heikkila J. Geometric camera calibration using circular control points [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2000, 22(10): 1066 - 1077.
- [5] ZHANG Z Y. A flexible new technique for camera calibration [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2000, 22(11): 1330 - 1334.
- [6] WANG Zhengzhou, XU Ruihua, HU Bingliang. Algorithm of semicircular laser spot detection based on circle fitting [J]. *Laser & Infrared*, 2013, 43(6): 708 - 711. (in Chinese)
王拯洲, 许瑞华, 胡炳樑. 基于圆拟合的非完整圆激光光斑中心检测算法[J]. *激光与红外*, 2013, 43(6): 708 - 711.
- [7] ZHEN Yi. Subpixel location of the center of laser spot based on spatial moments [J]. *Laser & Infrared*, 2005, 35(7): 521 - 523. (in Chinese)
郑毅. 基于空间矩的激光光斑中心亚像素定位[J]. *激光与红外*, 2005, 35(7): 521 - 523.
- [8] Steger C. An unbiased detector of curvilinear structures [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1998, 20(2): 113 - 125.
- [9] LI Weimin, YU Qiaoyun, HU Hongzhuan, et al. Iteration algorithm of surface fitting in the detection of light spot position [J]. *Optical Technique*, 2004, 30(1): 33 - 37. (in Chinese)
李为民, 俞巧云, 胡红专, 等. 光点定位中的曲面拟合迭代算法[J]. *光学技术*, 2004, 30(1): 33 - 37.
- [10] WEI Zhenzhong, GAO Ming, ZHANG Guangjun, et al. Sub-pixel extraction method for the center of light spot image [J]. *Opto - Electronic Engineering*, 2009, 36(4): 7 - 12. (in Chinese)
魏振忠, 高明, 张广军, 等. 一种光斑图像中心的亚像素提取方法[J]. *光电工程*, 2009, 36(4): 7 - 12.
- [11] LIU Zhen, SHANG Yanna. High precision location for multi-scale light spot center [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013, 21(6): 1586 - 1591. (in Chinese)
刘震, 尚砚娜. 多尺度光点图像中心的高精度定位[J]. *光学精密工程*, 2013, 21(6): 1586 - 1591.