

## 基于场景的红外光学系统渐晕效应校正方法

李召龙<sup>1</sup>, 沈同圣<sup>2</sup>, 史浩然<sup>1</sup>, 娄树理<sup>1</sup>

(1. 海军航空工程学院 控制工程系, 山东 烟台 264001;

2. 中国国防科技信息中心, 北京 100142)

**摘要:** 渐晕效应是红外成像过程中普遍存在的现象。由于红外成像系统输出的场景亮度或对比度通常较低, 所以渐晕效应对成像性能的影响非常严重, 因此对渐晕效应的校正也显得尤为重要。对渐晕效应的产生原因做了分析, 首先提出了一种渐晕快速校正方法。通过场景之间做差, 提取背景信息。用二维高斯函数逼近背景灰度分布, 得到较准确的校正因子, 从而实现渐晕校正。然后利用方差信息改进了背景提取方法, 使方法适用于较复杂的场景。提出像素点差值和的概念来评价校正效果, 校正后差值和普遍减小到未校正差值之和的 1/5 到 1/2。两种方法均不需要亮度均匀分布的参考背景, 即可实现对渐晕效应比较理想的校正。

**关键词:** 渐晕效应; 背景灰度分布; 二维高斯分布; 校正因子; 评价

**中图分类号:** TN216    **文献标志码:** A    **文章编号:** 1007-2276(2015)S-0008-05

## Scene-based method to correct vignetting effect of IR optical system

Li Zhaolong<sup>1</sup>, Shen Tongsheng<sup>2</sup>, Shi Haoran<sup>1</sup>, Lou Shuli<sup>1</sup>

(1. Department of Control Engineering, Naval Aeronautical and Astronautical University, Yantai 264001, China;

2. National Defense Science and Technology Information Center, Beijing 100142, China)

**Abstract:** The vignetting effect is a widespread phenomenon in the process of infrared imaging. Because the output brightness or contrast of the infrared imaging system is low, the impact of vignetting effect on the performance of the system is very serious. Therefore, it is particularly important to correct the vignetting effect. The cause of the generation of the vignetting effect was analyzed. Firstly, a fast correction method was proposed. The difference between scene was used to get background information. The background gray level distribution was approximated by the two-dimensional Gauss distribution, and the correction factor was obtained. Then the background extraction method was improved by using the variance information, and the method was applied to a more complex scene. The concept of the sum of pixel difference was presented. After correction, the sum of pixel difference decreaseal to 1/5-1/2 of the sum of pixel difference before correction. The correction effect of the two methods is better without using a reference scene of uniform gray distribution.

**Key words:** vignetting effect; background gray distribution; 2D Gauss distribution; correction factor; evaluation

收稿日期: 2015-10-05; 修订日期: 2015-11-03

基金项目: 国家自然科学基金(61303192)

作者简介: 李召龙(1987-), 男, 博士生, 主要从事光电制导、红外物理与技术、红外成像系统性能测试与仿真等方面的研究。

Email: zgzb1987@sina.com

导师简介: 沈同圣(1966-), 男, 研究员, 博士生导师, 博士, 主要从事光电制导、红外场景生成及仿真、图像处理等方面的研究。

## 0 引言

渐晕效应是指在光学系统中,远离光轴的物点成像时,由于光阑的存在,到达探测器表面的辐射随着偏轴距离的增大而减少,从而使得像平面中心区域较亮,而边缘区域较暗。渐晕效应严重影响了红外成像系统的成像质量。

渐晕校正方法可以分为两类<sup>[1]</sup>:LUT (Look Up Table) 方法和校正因子函数逼近法。LUT 方法是利用已知具有均匀强度分布的辐射源照射镜面反射能力很弱的参考场景,形成一幅参考背景图像  $I_{\text{ref}}$ <sup>[2]</sup>,从而形成校正因子参数表。参考背景图像每个像素位置的校正因子计算公式为:

$$I_{\text{LUT}}(i, j) = I_{\text{ref, max}} / I_{\text{ref}}(i, j) \quad (1)$$

式中:  $I_{\text{ref}}(i, j)$  为  $(i, j)$  位置像素的灰度值;  $I_{\text{ref, max}}$  为参考图像中灰度的最大值;  $I_{\text{LUT}}(i, j)$  为  $(i, j)$  位置像素的校正因子,此因子存放于参数表中。利用同一系统获得的图像  $I'$  可用此参数表校正:

$$I'(i, j) = I(i, j) * I_{\text{LUT}}(i, j) \quad (2)$$

LUT 方法是最精确的渐晕校正方法,常用于需要通过分析图像进行精确测量的场合,但是由于图像尺寸不同会对系统的内存有一定要求。

为了节省系统内存,在对图像测量精度要求相对较低的情况下,可采用一个恰当的函数来逼近参考图像中校正因子的分布情况<sup>[3-4]</sup>。文中提出了一种渐晕校正的快速方法:首先利用场景做差来提取背景信息,然后利用二维高斯函数对背景灰度值分布进行逼近,从而计算得到整个像平面校正因子的分布,进而实现对渐晕效应的校正。并利用方差信息对前面提出的方法进行了改进,提高了复杂场景下提取背景信息的准确度,增大了算法的适用范围。

## 1 渐晕效应机理分析

红外光学系统对远距离目标成像时,参与成像的充满入射光瞳的轴上光束能全部通过光学系统成像,而充满入射光瞳的轴外光束往往还要受到入射窗、透镜边框或附加光阑的限制,原来能通过入射光瞳的轴外光束被遮掉一部分,这样轴外点的成像光束要小于轴上点的成像光束,导致成像像面边缘的照度有所下降,以上这些原因致使红外光学系统发

生渐晕效应难以避免。

从轴外视场物面到光学系统入射窗和入射光瞳作追迹的光线<sup>[5]</sup>,如图 1 所示。 $\omega$  为半视场角,  $d$  为入射光瞳与入射窗之间的距离。当只考虑入射光瞳不考虑入射窗对成像光束的拦截作用时,水平光束经过入射窗在入射光瞳面上的投影是半径为  $r_1$  的圆,其面积为  $S_1$ ;当只考虑入射窗不考虑入射光瞳对成像光束的拦截作用时,斜光束在入射光瞳面上的投影是半径为  $r_2$  的圆,其面积为  $S_2$ ,  $h$  为两圆圆心的距离。两圆的重合部分就是斜光束所能通过的面积。按照几何光学和光度学理论可以证明,若物平面照度为均匀分布,渐晕系数  $K$  可以认为是两圆重合面积  $S$  与以  $r_1$  为半径单圆面积  $S_1$  之比,即:

$$K = \frac{S}{S_1} \quad (3)$$

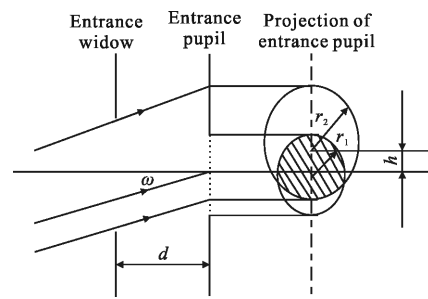


图 1 成像光束光路图

Fig.1 Schematic of the imaging beam

$K$  是  $r_1$ 、 $r_2$ 、 $h$ 、 $\omega$  的函数,参考文献[6]给出了渐晕系数  $K$  的详细表达式,此处不做详细讲解。由图 1 可以看到  $S$  两圆重合部分与两圆心距离  $h$  的密切关系,实际的  $h$  还要受到视场的限制,可取的最大值为  $d \tan \omega$ 。

## 2 基于场景的快速校正方法

渐晕效应在成像过程中是不可避免的,它对目标物和背景的亮度都有影响,如图 2 所示,记为  $I_0$ 、 $I_1$  是

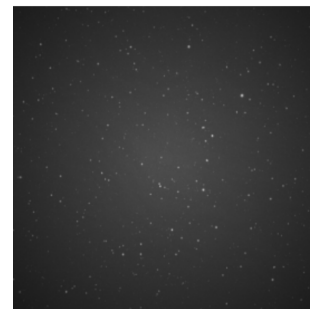


图 2 受渐晕影响的星空图像

Fig.2 Star image affected by vignetting effect

相机拍摄的受渐晕效应影响的星空图像。图像周围背景及星的亮度明显受到渐晕的影响而变暗,导致边缘位置星的亮度甚至比中心背景天空亮度都低,严重影响到对星空特征的统计,因此在对图像进行分析时,必须先对其进行渐晕校正。

## 2.1 提取背景

图 3(a)为  $I_1$  第 100 行像素的灰度值分布,由于受渐晕效应影响,背景灰度值呈现出由中心向两侧递减的趋势。图中高峰 1,2,3 分别表示三颗高亮度的星,高峰范围内有很大一部分像素灰度值比中心位置背景的灰度值要低,因此不能简单地用一个阈值来确定目标与背景<sup>[7]</sup>。具体背景提取方法如下:

(1) 求取差值图像:取同一相机拍摄的和  $I_1$  拍摄角度稍有差异的星空图像  $I_2$ ,将两幅图像做差得到差值图像  $I_{\text{diff}}$ ,即:

$$I_{\text{diff}}(i,j)=\text{abs}(I_1(i,j)-I_2(i,j)) \quad (4)$$

图 3(b)为  $I_{\text{diff}}$  第 100 行灰度值分布,可以明显看出通过图像做差,由于背景灰度的高度均匀性而使得背景灰度全部压缩到接近于零,而由于星位置发生了变化,使得做差后代表星的灰度高峰得到了保留。

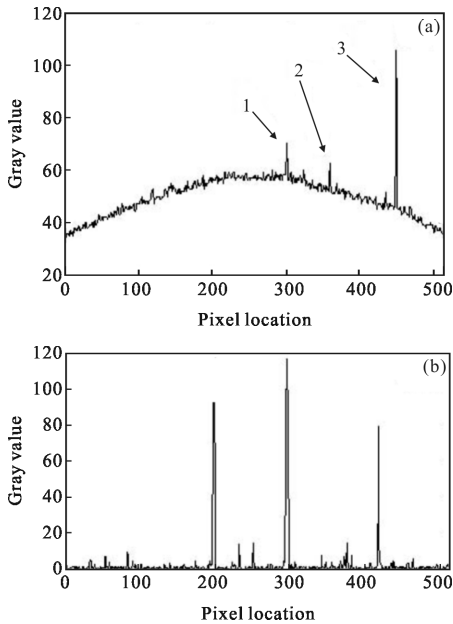


图 3 图像第 100 行像素灰度值  
Fig.3 Gray value of 100th row pixels

(2) 提取背景像素:经过多次测试,所提取的背景像素  $I_{\text{bg}}(i,j)$ 可按照如下方式选取:

$$I_{\text{bg}}(i,j)=\{I_1(i,j), \text{if } I_{\text{diff}}(i,j) \leq 3\text{aver}(I_{\text{diff}})\} \quad (5)$$

式中: $\text{aver}(I_{\text{diff}})$ 表示  $I_{\text{diff}}$  的灰度均值。 $I_{\text{bg}}$  为去掉目标像素的背景像素集合。

(3) 得到完整参考背景图像:通过最近邻插值法对  $I_{\text{bg}}$  缺失部分进行插值,使其成为完整的参考背景图像  $I_{\text{ref}}$ ,如图 4 所示。

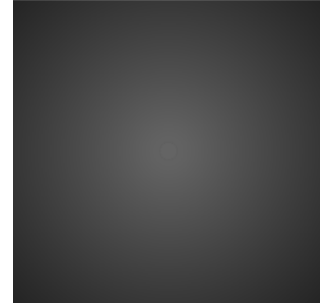


图 4 参考背景图像

Fig.4 Reference background image

## 2.2 灰度分布函数逼近

做出参考背景图像的灰度分布图,如图 5(a)所示,呈现出明显的由中心到边缘降低的趋势。其变化趋势可用二维高斯分布函数来逼近<sup>[8]</sup>:

$$f(x,y)=A\exp\left(-\frac{(x-x_0)^2}{2\sigma_x^2}-\frac{(y-y_0)^2}{2\sigma_y^2}\right) \quad (6)$$

式中: $(x,y)$ 表示像素坐标; $(x_0,y_0)$ 表示高斯分布中心位置。拟合时采用 Trust-Region(信赖域)最优化算法来找到逼近函数  $f(x,y)$  的参数,从而得到最终逼近函数。参数拟合结果为:

$$\begin{cases} A=69.47 \\ x_0=260.2 \\ y_0=252.5 \\ \sigma_x=187.2 \\ \sigma_y=188.5 \end{cases} \quad (7)$$

图 5(b)为逼近函数  $f(x,y)$  的三维分布图。从而,各坐标  $(i,j)$  像素校正因子  $F_{\text{CF}}(i,j)$ 按公式(8)计算:

$$F_{\text{CF}}(i,j)=f_{\text{max}}(i,j)/f(i,j) \quad (8)$$

式中: $f_{\text{max}}(i,j)$ 为  $f(i,j)$  的最大值; $f(i,j)$  为逼近函数  $f(x,y)$  在  $(i,j)$  位置的取值。

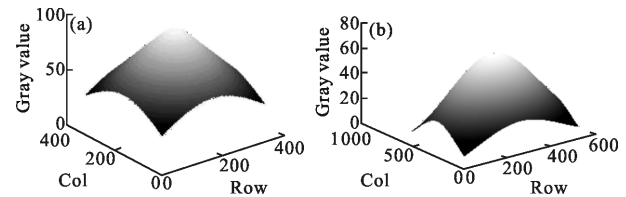


图 5 参考背景图像的灰度分布

Fig.5 Gray distribution of the reference background image

## 2.3 渐晕效应校正

假设校正后的图像为  $I'(i,j)$ , 渐晕效应校正公

式为:

$$I'(i, j) = I(i, j) * F_{\alpha}(i, j) \quad (9)$$

利用公式(9)对图 2 进行渐晕校正,校正结果如图 6 所示。对比图 6(a)、6(b)可以发现:校正后 6(b)图像质量明显改善,亮度均匀,灰度值由中心向两侧递减的趋势得到明显抑制,渐晕效应得到了很好的校正。图 6(c)、6(d)为原图像与校正后图像第 120 行灰度值分布,较直观地显示了第 120 行的灰度变化趋势,渐晕效应得到了较好的校正。

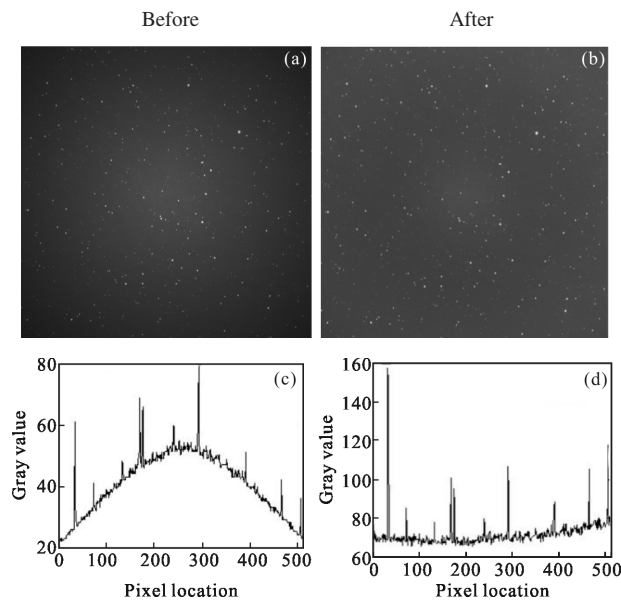


图 6 渐晕校正前后对比

Fig.6 Comparison of the images before and after correction

### 3 改进的校正方法

文章第 2 节中提出的方法对星空场景等灰度变化简单的情况的渐晕效应具有较好的校正效果,而且运算非常简单。但是该方法在处理成像质量较差、背景均匀性不是很理想的图像时其效果就会受影响,如图 7 所示。红外成像系统在拍摄航行的舰船时,除了舰船本身运动,海面也不停地发生波动,使



图 7 海面舰船图像

Fig.7 Image of ship target

得场景中灰度变化比较复杂,因此用图像做差法提取背景的效果不是很理想。

对第 2 节中提出的背景提取方法进行改进,利用同一系统拍摄的不同图像间像素的方差作为判断背景或目标的依据。改进后的背景提取方法如下:

(1) 取  $k$  幅大小为  $M \times N$  图像,先求  $k$  幅图像各像素点的平均值,然后获得各像素点的方差,计算方法如下:

$$\text{aver}(I) = \sum_{i=1}^k I_i / k \quad (10)$$

$$\text{var}(I(i, j)) = \sum_{i=1}^k (I_i(i, j) - \text{aver}(I(i, j)))^2 / k \quad (11)$$

(2) 选取背景像素:所求的背景像素  $I_{bg}(i, j)$  按照如下方式选取:

$$I_{bg}(i, j) = \begin{cases} I_1(i, j), & \text{if } I_{bg}(i, j) = \{I_1(i, j), \text{if } \text{var}(I(i, j)) \leq 3 \\ \frac{\text{sum}(\text{var}(I(:)))}{M \cdot N} \} \end{cases} \quad (12)$$

(3) 插值得到完整参考背景图像  $I_{bg}$ 。

此处取两幅舰船图像  $I_a$ 、 $I_b$ ,按上述改进方法提取背景。将方差矩阵转化为灰度图进行显示,如数值大于 255,按灰度值 255 进行显示,如图 8(a)所示。图 8(b)为用第 2 节中提出的方法得到的差值图像。改进的背景提取方法明显地提高了目标与背景的对比如,使得在复杂背景情况下背景提取更加准确。

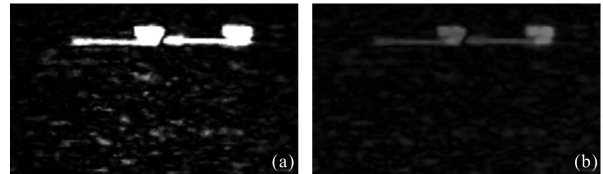


图 8 两种背景提取方法效果对比

Fig.8 Comparison between two segmentation method

改进背景提取方法之后,用二维高斯函数进行背景灰度值分布逼近,参数拟合结果为:

$$\begin{cases} A=138.2 \\ x_0=104.7 \\ y_0=54.15 \\ \sigma_x=94.87 \\ \sigma_y=96.4 \end{cases} \quad (13)$$

用公式(13)的拟合结果对舰船图像进行校正,结果如图 9 所示。对比图 9(a)、9(b)可以发现:校正后的 9(b)图像灰度分布均匀,渐晕效应得到了很好的校正。图 9(c)、(d)为原图像与校正后图像第 50 行灰度值分布。9(c)中出现了明显的灰度波峰,但是在

9(d)中灰度波峰得到了抑制,灰度分布不均的趋势得到了较好地校正,渐晕校正效果明显。

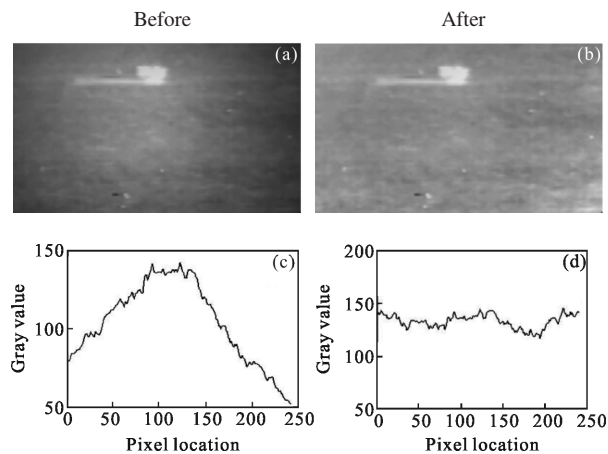


图 9 渐晕校正前后对比

Fig.9 Comparison of the images before and after correction

为评价渐晕校正效果,此处提出差值和 Diff 的概念,其定义见公式(14)。该参数反映了行像素间灰度值差异的大小。由拟合结果知,拟合函数中心坐标位于(104.7,54.15)处。在校正前后的图像上各选 8 行像素,每行在横坐标 104 前后分别选取 5 对像素点  $(p_i, p_{i+5})$  与  $(q_i, q_{i+5})$ ,  $i=1, 2, 3, 4, 5$ 。计算 10 对像素点的差值和,计算结果如表 1 所示。

$$\text{Diff} = \sum_{i=1}^5 (\text{abs}(p_{i+5}-p_i) + \text{abs}(q_{i+5}-q_i)) \quad (14)$$

表 1 像素点差值和

Tab.1 Sum of pixel difference

Row	1	2	3	4	5	6	7	8
Before correction	30	28	36	36	67	49	41	40
After correction	6	6	14	12	41	23	12	17

从表 1 的数据可以看出,校正后图像行像素点的差值和普遍减小到原渐晕图像的 1/5 到 1/2。校正效果非常明显。

## 4 结论

渐晕效应在红外系统成像时是不可避免的,严

重影响成像质量。文中提出了两种基于场景的渐晕效应快速校正方法。第 2 节中的方法通过图像做差,快速有效地提取背景信息,通过二维高斯函数对背景灰度分布进行逼近,准确求得渐晕图像的校正因子。该方法在背景灰度信息高度均匀的成像场景效果理想。第 3 节中对上述快速方法进行了改进,通过求取方差,使得目标与背景信息差异变大,更加准确地提取背景,使得其可以应用于背景灰度变化较复杂的情况。校正后的图像差值和参数普遍减小到原渐晕图像的 1/5~1/2。

## 参考文献:

- [1] Wonpil Yu. Practical anti-vignetting methods for digital cameras [J]. *IEEE Transactions on Consumer Electronics*, 2004, 50(4): 975-983.
- [2] Muralikrishna P, Prakash S, Subbaraya B H. Digital processing of spacelab imagery [J]. *Advanced Space Research*, 1982, 2(7): 107-110.
- [3] Yu W, Chung Y, Soh J. Vignetting distortion correction method for high quality digital imaging [C]//IEEE Int Conf Pattern Recognition, 2004, 3: 666-669.
- [4] Seon Joo Kim, Marc Pollefeys. Robust radiometric calibration and vignetting correction[J]. *IEEE Trans Ropami*, 2008, 30(4): 562-576.
- [5] Shi Haoran, Shen Tongsheng, Li Zhaolong, et al. Simulation of vignetting effect in infrared imaging system [J]. *Infrared Technology*, 2015, 37(4): 296-299. (in Chinese)  
史浩然, 沈同圣, 李召龙, 等. 红外系统中渐晕效应的模拟方法研究[J]. 红外技术, 2015, 37(4): 296-299.
- [6] Lei Chun, Zhang Baomin, Feng Shengrong. Research on vignetting in thermal imaging system [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2000, 29(4): 13-16. (in Chinese)  
雷春, 张保民, 冯生荣. 红外系统中渐晕的研究[J]. 红外与激光工程, 2000, 29(4): 13-16.
- [7] Lee S S, Pelet S, Peter M, et al. A rapid and effective vignetting correction for quantitative microscopy [J]. *Rsc Advances*, 2014, 4: 52727-52733.
- [8] He K, Tang P F, Liang R. Vignetting image correction based on Gaussian quadrics fitting [C]//2009 Fifth International Conference on Natural Computation, 2009: 158-161.