

基于多项式逼近的红外系统渐晕效应校正方法

李召龙¹, 沈同圣², 娄树理¹

(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: 渐晕效应是在红外成像时像平面中心区域较亮而边缘区域较暗的现象。渐晕效应对红外系统成像性能的影响非常严重, 因此系统使用时有必要对渐晕效应进行校正。首先对渐晕效应的产生原因做了分析, 然后提出了一种基于场景的渐晕校正方法。通过场景之间的方差信息提取背景, 用多项式逼近背景灰度分布, 得到校正因子, 从而实现渐晕校正。为评价校正效果, 提出具有统计意义的行间方差概念。分别利用星空和海面两种场景对校正方法进行验证。校正后行间方差减小到未校正行间方差的 13.6% 和 3.8%, 校正效果比较理想。

关键词: 渐晕效应; 背景灰度分布; 多项式逼近; 校正因子; 行间方差

中图分类号: TN216 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201645.S104002

Vignetting correction method for the infrared system based on polynomial approximation

Li Zhaolong¹, Shen Tongsheng², Lou Shuli¹

(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: Vignetting effect during infrared imaging is the phenomenon that image plane center region is bright but edge is dark. The vignetting effect is very serious, so it is necessary to correct the vignetting effect when the system is used. First, the cause of the vignetting effect was analyzed. Then, a fast correction method was proposed. The background information was extracted, and the background gray distribution was obtained by polynomial approximation. To evaluate the correction effect, the concept of variance between rows which has statistical significance was put forward. To verify the correction method, two kinds of scenes were used. Variance between rows was reduced to 13.6% and 3.8% compared with uncorrected images. The effect of the correction method is ideal.

Key words: vignetting effect; background gray distribution; polynomial approximation; correction factor; variance between rows

收稿日期: 2016-02-07; 修订日期: 2016-03-14

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

0 引言

渐晕效应是指在红外系统成像过程中, 远离光学系统光轴的物点成像时, 像平面中心区域较亮, 而边缘区域较暗的现象。红外系统成像一般对比度较低, 成像质量远不如可见光成像, 因此渐晕效应对红外系统的成像质量影响尤为严重。红外图像应用于精确测量或目标检测跟踪前有必要首先对渐晕效应进行校正。

渐晕校正方法可以分为两类^[1]: LUT(Look Up Table) 方法和校正因子函数逼近法。LUT 方法是将校正因子对应像素位置存储, 拍摄的图像只要将对应像素用所存储的校正因子进行校正即可^[2]。具体操作方法为: 利用强度分布均匀的辐射源照射镜面反射能力很弱的参考场景, 对此参考场景进行拍摄, 得到一幅参考背景图像 I_{ref} ^[3], 利用公式(1)计算各个像素位置的校正因子:

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

式中: $I_{ref}(i, j)$ 为参考背景图像 (i, j) 位置像素的灰度值; $I_{ref, max}$ 为参考图像中灰度的最大值; $I_{LUT}(i, j)$ 为 (i, j) 位置像素的校正因子, 此因子存放于参数表中。经同一红外系统拍摄的图像 I' 可按公式(2)进行校正:

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

LUT 方法是最精确的渐晕校正方法, 效果比较明显。但是由于图像尺寸不同而会对对系统的内存有一定要求。第二种方法是利用前面计算得到的参数表结果, 将各像素点的补偿因子的变化趋势用一个合适的函数来逼近^[4-5]。这种方法节省了系统内存, 适用于对校正精度要求不是特别高的情况下。

文中提出了一种基于多项式逼近的渐晕校正的快速方法, 可摆脱 LUT 方法和第二种函数逼近法中需要在理想情况下拍摄参考背景图像的限制。首先利用场景的方差信息提取背景信息, 然后利用二元三次多项式对背景灰度分布进行逼近, 从而计算得到整个像平面校正因子的分布, 随着每帧图像的处理进而实现对渐晕效应的校正。

1 渐晕效应机理分析

红外成像系统的渐晕效应主要由两个因素引起。一是受到入射窗、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。此种情况下发生的渐晕可用渐晕系数 K 表示, 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。第二个原因是余弦四次定律决定的^[7]。如图 1 所示, 与镜头平行的入射光束聚集在像平面中心 A 点成像, 假设它的照度是 I_A 。与光轴成 ω 角度的光束聚集在像平面 B 点成像时的照度为 I_B 则:

$$I_B = I_A \cos^4 \omega \quad (3)$$

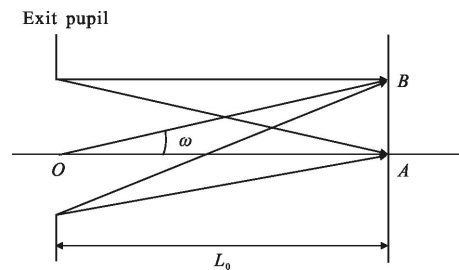


图 1 出瞳光束示意图

Fig.1 Light beam out of the exit pupil

综合上述两种原因, B 点与 A 点接收到的照度之比为:

$$\frac{I_B}{I_A} = K \cos^4 \omega \quad (4)$$

因此, 离像平面中心位置越远的点, 接收到的照度越小, 表现在图像上就是渐晕效应, 如图 2 所示, 记为 I_1 。 I_1 是相机拍摄的受渐晕效应影响的星空图像。图像边缘亮度明显低于中心亮度。在星空目标检测以及识别过程中, 位于图像边缘位置的目标由于渐晕效应的存在导致亮度降低, 可能导致目标漏检。因此, 光学系统投入使用前必须进行渐晕校正。



图 2 受渐晕影响的星空图像

Fig.2 Star image affected by vignetting effect

2 渐晕效应校正过程

第 0 节提到 LUT 方法和校正因子函数逼近法均需要对强度分布均匀的参考场景进行拍摄, 得到参考图像。而在实际应用时, 一般难以获得参考图像, 需要直接从实拍图像中通过分割出背景信息来获取渐晕的相关信息, 从而实现校正。

2.1 背景分割

通过分析图像的直方图, 分析出目标和背景是否具有独立的灰度分布区间, 从而设置合理的阈值, 可以实现目标与背景的分割。例如参考文献[8]提出的局部阈值方法与参考文献[9]提出的全局阈值方法均可以取得一定的分割效果。但是当目标与背景直方图灰度分布区间有很大重叠时, 两种阈值法均不能取得良好的效果, 如图 3 所示。图 3(a) 为受渐晕影响的海面舰船灰度图像, 图 3(b) 为其灰度直方图分布。通过分析直方图, 背景灰度分布与目标灰度分布糅合在一起, 很难得到一个可以将舰船目标与海面及天空背景进行有效分割的阈值。

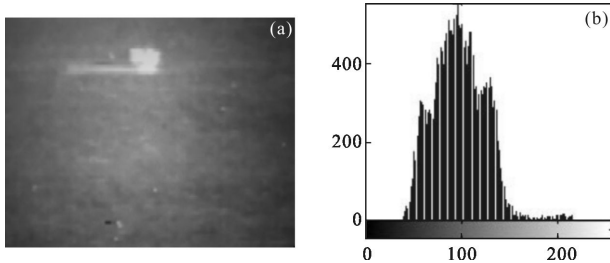


图 3 舰船图像及其直方图

Fig.3 Ship image and its histogram

红外系统在使用时, 目标会在视场中发生位移或目标区域本身辐射强度存在波动。鉴于此, 可对同一系统拍摄的不同图像间对应位置像素求取方差。利用此方差作为度量, 使得目标与背景的差异变大, 从而以方差大小作为判断背景或目标的依据。具体操作方法如下:

(1) 取 k 帧大小为 $M \times N$ 的图像, 求 k 帧图像各像素点的平均值, 然后获得各像素点的方差 $\text{var}(i, j)$, 计算方法如下:

$$\begin{aligned} \text{aver}(I) &= \sum_{i=1}^k I_i/k(5) \\ \text{var}(i, j) &= \sum_{i=1}^k (I_i(i, j) - \text{aver}(I(i, j)))^2/k \end{aligned} \quad (6)$$

(2) 计算全局阈值 thr , 提取背景像素:

$$\text{thr} = 3 \cdot \frac{\text{sum}(\text{var}(:))}{M \times N} \quad (7)$$

背景像素 $I_{bg}(i, j)$ 可按照如下方式选取:

$$I_{bg}(i, j) = \{I_1(i, j), \text{ if } \text{var}(i, j) \leq \text{thr}\} \quad (8)$$

(3) 通过最近邻插值法对 I_{bg} 缺失部分进行插值, 使其成为完整的参考背景图像 I_{ref} 。

2.2 得到灰度分布模型

为了得到 I_{ref} 的灰度分布模型, 可以用二元三次多项式进行逼近^[10]:

$$\begin{aligned} f(x, y) &= p_{00} + p_{10}x + p_{01}y + p_{20}x^2 + p_{11}xy + p_{02}y^2 + p_{30}x^3 + \\ & p_{21}x^2y + p_{12}xy^2 + p_{03}y^3 \end{aligned} \quad (9)$$

式中: (x, y) 为像素坐标; 拟合后得到 $p_{00}, p_{10}, p_{01}, p_{20}, p_{11}, p_{02}, p_{30}, p_{21}, p_{12}, p_{03}$ 十个参数。利用 Levenberg-Marquardt 算法^[11]来寻找逼近参数, 使得误差 ε 最小。

$$\varepsilon = \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N (I_{ref}(i, j) - f(i, j))^2 \quad (10)$$

2.3 计算校正因子并校正图像

各坐标 (i, j) 像素校正因子 $F_{CF}(i, j)$ 按公式(11)计算:

$$F_{CF}(i, j) = f_{\max}(i, j) / f(i, j) \quad (11)$$

式中: $f_{\max}(i, j)$ 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。假设校正后的图像为 $I'(i, j)$, 渐晕效应校正公式为:

$$I'(i, j) = I(i, j) * F_{CF}(i, j) \quad (12)$$

3 实验验证

选用星空图像和海面舰船图像对方法进行验证: 二者的区别在于海面舰船图像成像质量较差, 而且由于受到海面反射以及波浪的影响, 海面背景灰度情况比较复杂。

3.1 星空图像验证

用成像质量较好的星空图像对校正方法进行验证。首先提取参考背景图像, 并显示其灰度分布如图 4(a) 所示。利用二元三次多项式对其进行逼近得到多项式拟合参数如公式(13), 图 4(b) 为拟合结果的三维显示图。

$$\begin{aligned} p_{00} &= 18.08 & p_{10} &= 0.3936 & p_{01} &= 0.3827 \\ p_{20} &= -0.001434 & p_{11} &= 1.678e-05 \\ p_{02} &= -0.001611 & p_{30} &= -3.345e-07 \\ p_{21} &= 2.208e-07 & p_{12} &= -2.51e-07 & p_{03} &= 3.75e-07 \end{aligned} \quad (13)$$

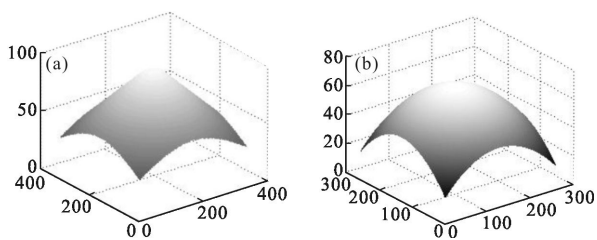


图 4 参考背景图像及其灰度分布

Fig.4 Reference background image and gray distribution

根据公式(11)、(12)对渐晕图像进行校正。图 5(a)为校正前图像,校正后(b)图像质量明显改善,亮度均匀。图像灰度横向分布情况可以有效反应渐晕效应的校正效果,因此选取校正前、后图像第 100 行像素,显示其灰度值,如图 5(c)、(d)所示。校正前灰度值有一个明显的波峰,校正后波峰被拉直,灰度分布变得平直,渐晕效应得到了较好的校正。进一步,求取图像每列像素点的灰度均值,将结果显示在图 5(e)中。实线“-”表示的是校正后的列灰度均值分布情况,点划线“-.”为校正前的列灰度均值分布情况。由于图像边缘部分的灰度得到了提升,所以校正后的列灰度均值要整体高于校正前的列灰度均值。而且从曲线上看,图像中间亮边缘暗的情况也得到了较好的校正。

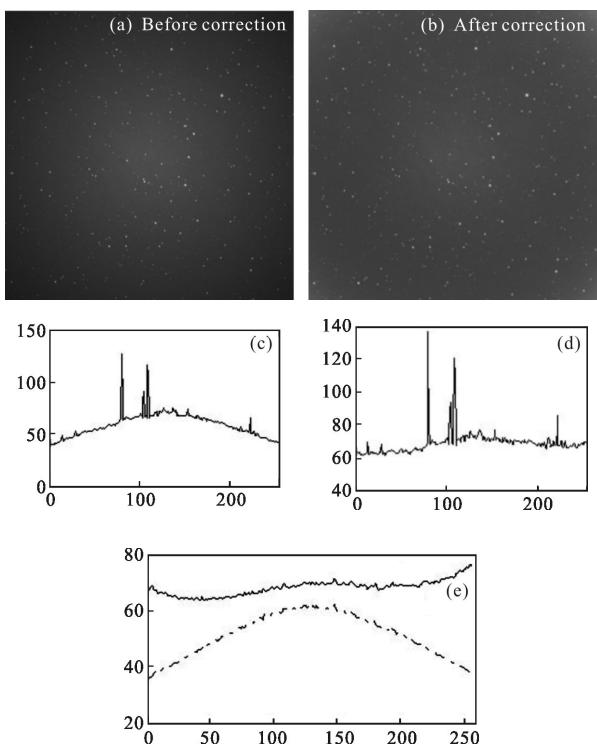


图 5 渐晕校正前后对比

Fig.5 Comparison of the results between before and after correction

为更好地评价渐晕校正效果,提出行间方差的概念,其定义见公式(14)。该参数从统计意义上反映了每行之间像素灰度值差异的大小。校正用到的图像尺寸为 256×256,设第 i 列像素灰度均值为 ave_i ,求取 256 个灰度均值 ave_i 之间的方差 var 即为行间方差。

$$var = \sum_{i=1}^{256} (ave_i - \overline{ave})^2 / 256 \quad (14)$$

经计算,校正前图像的行间方差为 57.80,校正后图像的行间方差为 7.55,行间方差减小到原渐晕图像的 13.6%,校正效果非常明显。

3.2 海面舰船图像验证

图 6 为红外成像系统拍摄的海面舰船图像。受海区空气湿度较大等原因影响,舰船目标与海面背景的对比度不高。

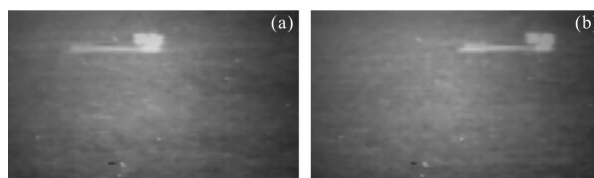


图 6 海面舰船图像

Fig.6 Image of ship target

取两幅舰船图像 I_a 、 I_b ,按 2.1 节方法提取背景。将得到的方差矩阵转化为灰度图进行显示,如图 7(a)所示,若数值大于 255,按 255 进行显示。

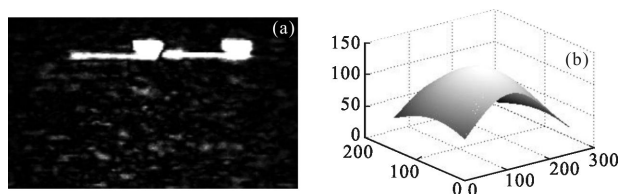


图 7 背景提取结果

Fig.7 Result of proposed segmentation method

背景提取之后,用二元三次多项式进行背景灰度值分布逼近,逼近结果显示为图 7(b)。参数拟合结果为:

$$\begin{aligned} p_{00} &= 51.7 & p_{10} &= 1.303 & p_{01} &= 0.9194 \\ p_{20} &= -0.007782 & p_{11} &= -0.002275 \\ p_{02} &= -0.009886 & p_{30} &= 7.849e-06 \\ p_{21} &= 8.141e-06 & p_{12} &= 8.271e-06 & p_{03} &= 1.876e-05 \end{aligned} \quad (15)$$

用公式(15)的拟合结果对舰船图像进行校正,校正结果如图 8(b)所示,可以看到渐晕效应得到了较好的校正。图 8(c)、(d)为原图像与校正后图像第 90 行灰度值分布。图(c)中出现了明显的灰度波峰,图(d)中曲线未出现明显的波峰,显示图像灰度分布不均的情况得到了很好的校正。按照 3.1 节的方法求取图像每列像素点的灰度均值,将结果显示在图 8(e)中。实线“-”表示的是校正后的列灰度均值分布情况,点划线“-·-”为校正前的列灰度均值分布情况。通过比较两条曲线可知:校正后图像的边缘灰度值得到了较大的提升,渐晕效应得到了校正。

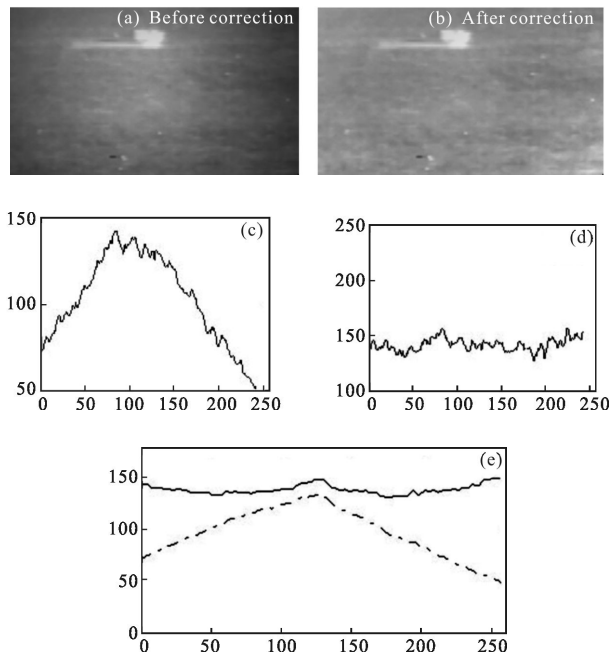


图 8 渐晕校正前后对比

Fig.8 Comparison between before and after correction

利用前面提出的行间方差概念评价渐晕校正效果。校正前的行间方差为 183.69,校正后的行间方差为 7.02,仅为校正前的 3.8%,校正效果比较好。

4 结论

文中研究了渐晕现象产生的原因以及对图像的影响。在此基础上,提出了一种基于多项式逼近的渐晕效应校正方法。利用多帧图像像素间的方差信息,增大背景与目标之间的灰度差异,准确有效地对背景进行分割。利用 Levenberg-Marquardt 最优化算法,

通过二元三次多项式对背景灰度分布进行逼近,从而得到渐晕校正因子,实现对渐晕效应的校正。利用星空图像及海面舰船图像对校正方法进行了验证,结果显示该方法能够有效抑制渐晕效应,校正后的图像行间方差分别减小到原渐晕图像的 13.6%和 3.8%。

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] Feng Qiang, Huo Junyan, Yang Haitao. Anovel anti-vignetting method [J]. *Electronic Science and Technology*, 2007(10): 67-70. (in Chinese)
- [3] Muralikrishna P, Prakash S, Subbaraya B H. Digital processing of spacelab imagery [J]. *Advanced Space Research*, 1982, 2(7): 107-110.
- [4] 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.
- [5] Seon Joo Kim, Marc Pollefeys. Robust radiometric calibration and vignetting correction [J]. *IEEE Trans ROPAMI*, 2008, 30(4): 562-576.
- [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)
- [7] Chen Siyu, Dai Shuguang, Mu Pingan. Correction of CCD camera lens vignetting[J]. *Applied Mechanics and Materials*, 2013, 373-375: 603-607.
- [8] Wu H S, Berba J, Gil J. Iterative thresholding for segmentation of cells from noisy images. [J]. *Journal of Microscopy*, 2000, 197(Pt3): 296-304.
- [9] Xavier J B, Schnell A, Wuertz S, et al. Objective threshold selection procedure (OTS) for segmentation of scanning laser confocal microscope images [J]. *Journal of Microbiological Methods*, 2001, 47(2): 169-180.
- [10] Piccinini F, Lucarelli E, Gherardi A, et al. Multi-image based method to correct vignetting effect in light microscopy images[J]. *Journal of Microscopy*, 2012, 248(1): 6-22.
- [11] Aijun L, Hejun L, Kezhi L, et al. Modeling of CVI process in fabrication of carbon/carbon composites by an artificial neural network [J]. *Science in China Ser E*, 2003, 46(2): 173-181.