

# 热像仪聚焦程度对红外辐射检测的影响研究

李 众<sup>1</sup>, 郝争辉<sup>2</sup>, 王 高<sup>2</sup>, 张 猛<sup>2</sup>

(1. 中北大学 软件学院, 山西 太原 030051; 2. 中北大学 电子测试技术国家重点实验室, 山西 太原 030051)

**摘要:** 热像仪主要依据红外辐射定律对物体由于温度产生的红外辐射进行测量, 是非接触式测温方式的一种方法。在保持其它影响测温精度因素不变的条件下, 通过保持热像仪稳定输出来提高精准度。实验采用黑体作为目标辐射源, 并将温度设定后保持不变。保持热像仪与辐射源的位置固定不变, 只调节聚焦程度来采集数据。分析热像仪聚焦程度对其输出值的影响, 通过分析可以看出对于均匀的辐射目标源, 当热像仪离焦时各个随机点输出的值不一致。只有当其在聚焦的状态下, 随机点及区域输出的值才趋于稳定。并计算各点的在不同聚焦程度下的变异系数及区域内方差, 进一步确定热像仪输出值的稳定性。实验表明: 热像仪聚焦程度对其输出值有较大影响, 利用文中聚焦程度与变异系数、区域内方差的计算对于判别热像仪输出值的稳定性具有一定的作用。

**关键词:** 聚焦程度; 红外热像仪; 热辐射; 变异系数

**中图分类号:** TN215      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1001-8891(2019)03-0245-06

## The Influence of Degree of Thermal Imager Focusing on the Detection Accuracy of Infrared Radiation

LI Zhong<sup>1</sup>, HAO Zhenghui<sup>2</sup>, WANG Gao<sup>2</sup>, ZHANG Meng<sup>2</sup>

(1. Software Academy North Central University, Taiyuan 030051, China;

2. State Key Laboratory of Electronic Testing Technology, North Central University, Taiyuan 030051, China)

**Abstract:** Based on radiation laws, infrared radiation caused by temperature can be measured by thermal imagers, as one of non-contact temperature measuring method. Keeping other factors unchanged, we manage to improve the precision of thermal imagers. We used blackbody as the target radiation source, and the temperature is set to remain unchanged. Keeping a fixed distance between the thermal imager and the radiation source, we adjust the degree of focus to collect data. Influence of the degree of focus of the thermal imager on its output values is analyzed. It can be found that the values of the random points are not consistent with uniform radiation target sources, when the thermal imager is out of focus. Only when it is in a focused state, the random points and the regional output values tend to be stable. Variation coefficients and variances of every points in the region in different focusing degrees were calculated, the stability of the output values of the thermal imager were determined. The experimental results show that the degree of focus of the thermal imager has a great influence on its output values. Variation coefficients and variances in the region can be used to determine the stability of the output values of thermal imagers.

**Key words:** degree of focus, infrared thermal imager, thermal radiation, coefficient of variation

## 0 引言

红外测温是非接触式测温方式, 具有测温范围广、响应时间短等优势<sup>[1]</sup>。热像仪能够将检测出目标体表面温度场的分布情况, 经电路将红外辐射数据转换成可见光图像。近几年来, 运用热像仪来侦测所选定的物体, 对探测范围内的物体进行无损检测, 这些

技术已经在消防安保、机电设备、空间遥感等相关领域得到应用<sup>[2]</sup>。运用热像仪对物体进行辐射测量时, 首要任务是进行标定。在热像仪标定时, 由于所成红外图像的清晰度直接影响辐射和表面温度之间关系的建立<sup>[3]</sup>。在实际操作中随着热像仪聚焦程度的变化其输出值也在变化, 使得所测温度值也会变化。

本文通过红外热像仪标定时所采集的数据对其

收稿日期: 2017-04-26; 修订日期: 2017-06-08.

作者简介: 李众 (1974-), 男, 博士研究生, 硕导, 副教授。研究方向, 软件开发, 图像处理, 人工智能等。E-mail: lizhong@nuc.edu.cn.

进行分析,对比红外热像仪在不同聚焦程度下所采集的数据,从而得出红外热像仪在聚焦程度达到一定状态后输出值保持稳定。

## 1 热像仪辐射测温原理

热像仪主要依据红外辐射定律对物体的温度进行测量。通过物体表面发射出的红外辐射量来确定该物体的红外热图像与温度分布。在热像仪标定时,当热像仪镜头距离黑体为  $d$ , 此时热像仪接受到的总辐射度为:

$$L = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \{ \tau_d(\lambda, d) L(\lambda, T_0) + [1 - \tau_d(\lambda, d)] L(\lambda, T_a) \} d\lambda \quad (1)$$

式中:  $\tau_d(\lambda, d)$  是辐射度在大气传输过程中辐射度的光谱透过率;  $T_a$  为气温;  $T_0$  为标定所用黑体的温度<sup>[4]</sup>。式中第一项是标定所用黑体辐射出的光谱辐亮度; 第二项为大气路径的光谱辐亮度。

通过镜头到达热像仪探测器的辐照度是:

$$E = A_0 d^{-2} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \{ \tau_d(\lambda, d) L(\lambda, T_0) + [1 - \tau_d(\lambda, d)] L(\lambda, T_a) \} d\lambda \quad (2)$$

式中:  $A_0$  是热像仪最小空间张角所对应的目标可视面积;  $d$  为黑体到热像仪的距离。测温时通常  $A_0 d^{-2}$  为常数。

一般情况下  $2 \sim 5 \mu\text{m}$  或  $8 \sim 13 \mu\text{m}$  这两个波段是热像仪工作的波段, 热像仪前面所装的镜头只允许这两个特定波段的辐射能量进入, 抵达探测器。感应探测器在该特定波段上对抵达信号的辐射能量进行积分, 并将其转换为与辐射能量成正比的可测量的电信号<sup>[5]</sup>。特定波段的光从镜头到热像仪探测器辐射功率是:

$$P_\lambda = E_\lambda A_R \tau_0(\lambda) \quad (3)$$

式中:  $A_R$  是热像仪镜头的面积大小;  $\tau_0(\lambda)$  是透镜的透射比。

热像仪输出可测量的电信号为:

$$\begin{aligned} V_s &= R(\lambda) P_\lambda = R(\lambda) E_\lambda A_R \tau_0(\lambda) \\ &= A_0 d^{-2} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \{ \tau_d(\lambda, d) L(\lambda, T_0) + [1 - \tau_d(\lambda, d)] L(\lambda, T_a) \} d\lambda \end{aligned} \quad (4)$$

式中:  $R(\lambda)$  是热像仪的响应度, 是热像仪中探测器将所探测目标的辐射能量转换为可测量的电信号响应能力。依据普朗克辐射定律, 特定波段所产生的辐射出射度  $L(T)$  是:

$$L(\lambda, T) = \varepsilon \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{c_1}{\lambda^5 (e^{\frac{c_2}{\lambda T}} - 1)} d\lambda \quad (5)$$

式中:  $c_1 = 3.7415 \times 10^4 \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \mu\text{m}^4$ ;  $c_2 = 1.43879 \mu\text{m} \cdot \text{K}$  分别为辐射常数;  $\varepsilon$  为发射率。

从上述表达式中可以看出, 对热像仪测温造成影

响的主要因素有大气透射率、物体的发射率。而其中的大气透射率又受到所处环境温度、被测物与热像仪的距离、环境湿度等因素的影响。除此之外热像仪测温造成还受到气压、风速、太阳辐射等的影响<sup>[6]</sup>。

## 2 实验方法

测试装置采用德国的 LUMASENSE-M390 黑体作为目标辐射源 ( $\varepsilon=0.99$ )。GH-G003 型热像仪, 测量波段为  $7.7 \sim 12.6 \mu\text{m}$ 。黑体设定为  $200^\circ\text{C}$ , 距离为  $7 \text{ m}$ 。

为了研究热像仪聚焦程度对测温影响大小, 所以此次实验选取黑体作为辐射源, 被测物的发射率  $\varepsilon=0.99$ 。选取室内作为实验场地, 这样可以减小风速、太阳辐射等因素带来的影响。而且在室内条件下, 环境温度与湿度比较稳定。实验采集数据时, 目标辐射源与热像仪之间的相对位置保持不变。

实验时首先选取标定过的黑体作为辐射目标, 确定黑体位置及热像仪测试距离。将辐射源设置到一定恒温条件下并使其保持稳定状态。使用热像仪对此黑体辐射源在不同聚焦程度下的数据进行采集。

## 3 实验结果与分析

文中采用 Robert 函数来进行聚焦程度检测。

利用 Robert 算子作为卷积模板进行判断<sup>[7-8]</sup>:

$$F = \sum_{i=0}^{L-1} \sum_{j=0}^{L-1} \{ [f(x, y) - g(x+1, y+1)]^2 + [f(x+1, y) - g(x, y+1)]^2 \} \quad (6)$$

利用 Robert 函数来对文中图像进行聚焦程度进行计算, 其中  $F$  表示聚焦程度。

下面通过仿真实验来分析聚焦程度对于特征量的影响关系。实验选取的图像为热像仪采集的不同聚焦情况下的红外图像。

因为红外图像是在不同的聚焦程度下所采集的, 所以图像具有一定的离焦程度。红外热像仪在不同的聚焦情况下不但使获取的红外图像变得离焦, 同样使热像仪采集到的电压信号发生变化。这样会使得运用热像仪所测量的温度在数值上产生偏差。本文根据红外热像仪在不同聚焦程度下所获取的数据来对热像仪的测温偏差进行分析。

首先在获取的红外图像中在目标物(黑体)上随机的取 5 个点来观测 5 个随机点在不同聚焦程度下的电信号响应值变化规律。然后在目标区域内随机取一个  $5 \times 5$  大小的矩形区域来对其期望值与方差的变化规律进行分析。

图 1 为红外热像仪在离焦-聚焦-离焦过程中所采集的图像。

如图 2 所示在所获取的红外图像目标物上随机获

取 5 个点，及  $5\times 5$  大小的矩形区域。

图 3 中为热像仪在聚焦程度不变的情况下所获取的数据，随机选取的 5 个点的变化趋势如图 3(a)所示。可以看出各个点热像仪输出电压值基本保持稳定。因为聚焦程度不是最佳情况，所以在目标物上随机选取的 5 个不同位置点的输出值差异较大。在对同一个均

匀物体探测时，由于各个位置的聚焦程度不同，从而导致热像仪输出值具有较大差异。图 3(b)为在目标物上选取  $5\times 5$  的矩形区域内热像仪输出的均值。在聚焦程度不变的情况下，热像仪矩形区域内输出的均值基本保持不变，较为稳定。

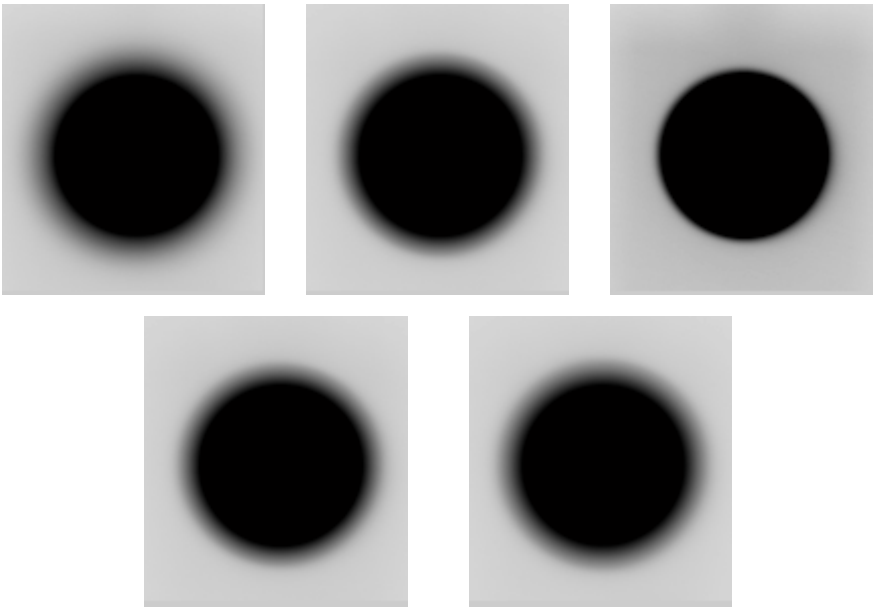
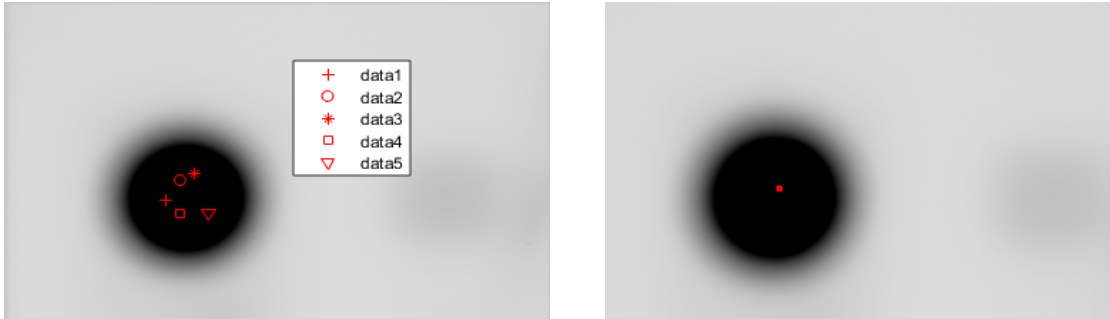
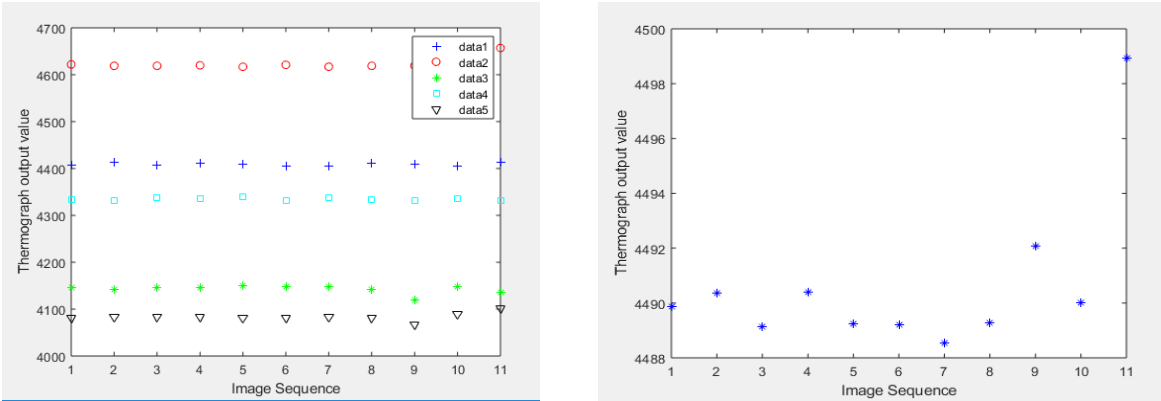


图 1  离焦-聚焦-离焦状态下的红外图像      Fig.1  Infrared images in defocus-focusing-defocus state



(a) 随机选取的 5 个点      (a) Points selected randomly      (b) 随机选取的  $5\times 5$  区域      (b) Randomly selected  $5\times 5$  area

图 2  在图像中随机选取的位置      Fig.2  Randomly selected positions in the image



(a) 随机选取的点输出值      (b) 随机选取的区域输出值

(a) Output value of the randomly selected point      (b) Output value of the randomly selected position

图 3  热像仪在相同聚焦程度下的输出值      Fig.3  Output values of thermal imager at the same degree of focus

表 1 中的数据为目标物上选取  $5\times 5$  的矩形区域内热像仪输出的均值及方差。从表中的数据可以看出在聚焦程度不变的情况下，热像仪在此区域内输出的均值及方差基本保持稳定的输出。

如图 4 所示在所获取的红外图像目标物上随机获取 5 个点，及  $5\times 5$  大小的矩形区域。

在聚焦程度不同的情况下，热像仪的输出值变化如图 5。

从图 5(a)可以看出红外热像仪单点的输出值随着其获取的图像聚焦而变得稳定。当热像仪离焦时，对于同一均匀目标物体其输出值变得不稳定。而且各个

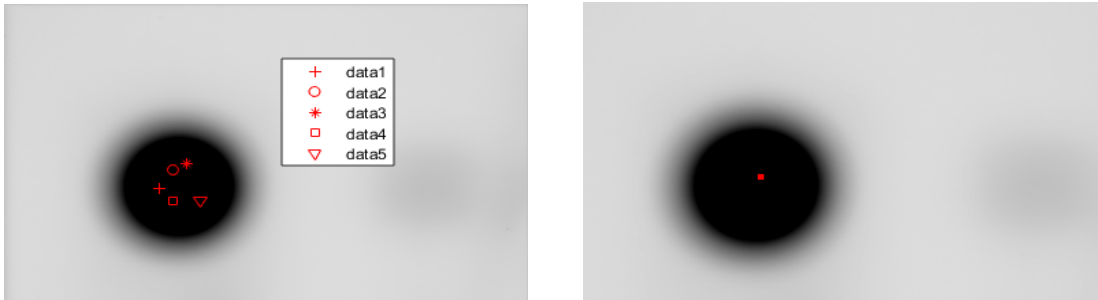
输出值之间的差别还比较大。当红外热像仪聚焦时，各点的输出值趋于稳定，且输出值之间的差异变小。同样图 5(b)中随机选取的区域内热像仪的输出值，也随着其聚焦而变得平缓。离焦时，区域内输出值的均值变化起伏比较大。

从表 2 中可以看出随着热像仪聚焦程度的不同，区域内输出值之间的差异较大。当热像仪聚焦时，区域方差减小说明区域内各点输出值趋于一致。

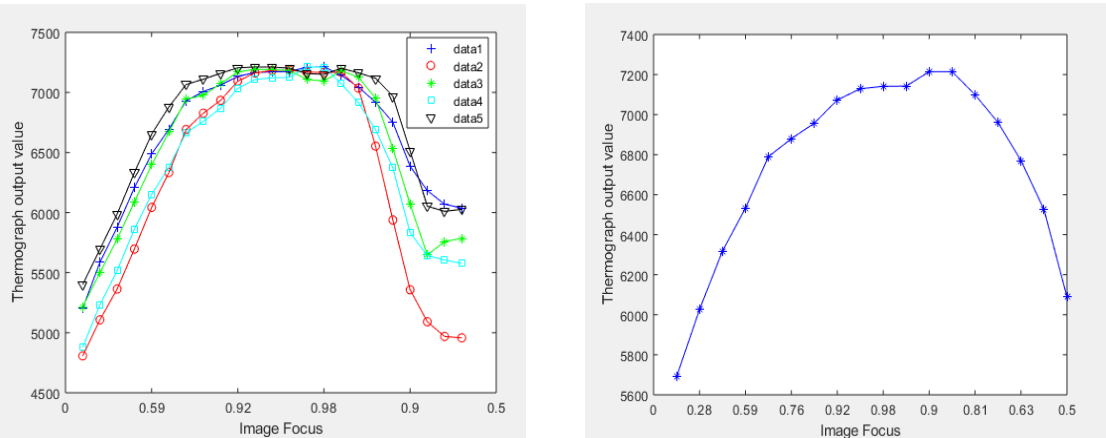
在上述数据的基础上利用清晰度比率、平缓区波动量、灵敏度等<sup>[8]</sup>3 个指标来对数据进行分析：

表 1 随机区域内热像仪输出值期望和方差  
Table 1 Expectations and variance of output values of thermal imagers in random regions

| Image sequence | 1       | 2       | 3       | 4       | 5       | 6       | 7       | 8       | 9       | 10      | 11      |
|----------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| Expect         | 4489.86 | 4490.36 | 4489.14 | 4490.39 | 4489.25 | 4489.19 | 4488.56 | 4489.28 | 4492.08 | 4490.03 | 4498.92 |
| variance       | 48.96   | 47.59   | 48.86   | 49.54   | 48.74   | 49.01   | 48.74   | 48.36   | 48.61   | 49.31   | 49.43   |



(a) 随机选取的 5 个点 (a) 5 points that randomly selected (b) 随机选取的  $5\times 5$  区域 (b) Randomly selected  $5\times 5$  area  
图 4 在图像中随机选取的位置 Fig.4 Randomly selected positions in the image



(a) 随机选取的点输出值 (b) 随机选取的区域输出值  
(a) Output value of the randomly selected point (b) Output value of the randomly selected position

图 5 热像仪在不同聚焦程度下各位置的输出值  
Fig.5 Output value of thermal imager at the different degree of focus

表 2 在不同聚焦状态下随机区域内热像仪输出值的方差

Table 2 Variance of the output value of thermal imager in random region under different focusing conditions

|             |        |        |        |        |       |       |       |
|-------------|--------|--------|--------|--------|-------|-------|-------|
| Image focus | 0.52   | 0.59   | 0.7    | 0.86   | 0.9   | 0.94  | 0.95  |
| Variance    | 277.92 | 241.58 | 191.82 | 163.97 | 86.06 | 32.50 | 15.40 |

|             |       |      |       |       |       |        |        |        |
|-------------|-------|------|-------|-------|-------|--------|--------|--------|
| Image focus | 0.98  | 1    | 0.97  | 0.93  | 0.92  | 0.88   | 0.76   | 0.49   |
| Variance    | 10.04 | 8.82 | 14.32 | 47.18 | 63.67 | 119.15 | 207.33 | 312.20 |

清晰度比率  $R$ ，是利用最大值与最小值的比值来进行衡量：

$$R=f_{\max}/f_{\min} \tag{7}$$

式中： $f_{\max}$  为热像仪输出值的最大值； $f_{\min}$  为热像仪输出值的最小值。清晰度比率表征了在不同聚焦程度下热像仪输出值的分辨能力。 $R$  越大，热像仪的输出值随图像聚焦程度变化差异越大。

在热像仪聚焦过程中，当热像仪聚焦达到一定程度后，此时输出值的变化较小。在此过程中输出值呈现波动状态。为了衡量平缓区波动程度，定义平缓区的标准差  $V_f$ ：

$$V_f=\sqrt{\frac{1}{N}\sum_{i=1}^N\left(f_i-\overline{f_i}\right)^2} \tag{8}$$

用灵敏度来表征热像仪输出值在最大值附近的变化剧烈程度。定义如下：

$$f_{sen}=\frac{f_{\max}-f\left(z_{\max}+\varepsilon\right)}{f\left(z_{\max}+\varepsilon\right)} \tag{9}$$

式中： $f_{\max}$  为热像仪输出值的最大值； $f\left(z_{\max}+\varepsilon\right)$ 为横坐标变化 $\varepsilon$ 时的取值。

从表 3 中清晰度比率的大小可以看出在聚焦程度变化的情况下，热像仪输出值差异的情况。从灵敏度与平缓区波动量的数据中可以得到热像仪在达到一定的聚焦程度情况下，输出值变得比较稳定。此时，热像仪的输出值不再随聚焦程度的改变而大幅度变化。

从表 4 中可以看出，利用在不同聚焦程度下热像仪输出值进行差分运算的结果。热像仪的输出值变化幅度随着图像的聚焦而减小。在热像仪聚焦程度达到一定程度时，其输出值变化幅度较小。此时热像仪的输出值达到稳定状态。

从实验分析结果可以得出在聚焦程度不同的情况下，对于同一均匀的目标物（黑体）热像仪的输出值差别比较明显。为使热像仪对物体进行测量时，能够输出稳定可靠的数值。本文中采用以下步骤对热像

仪输出值分析判别（流程图如图 6 所示）。

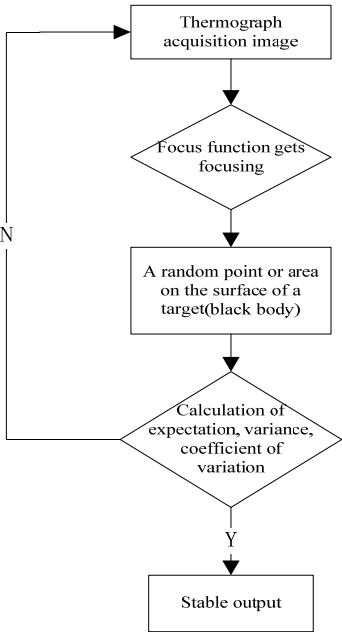


图 6 分析判别流程

Fig.6 Analysis of discriminant processes

热像仪在标定时，一般采用黑体作为标定的目标辐射源。因黑体温度可控，且目标所产生的温度均匀。首先采用聚焦函数针对采集到的红外图像的聚焦程度进行判别。然后在采集的聚焦序列图像上目标物的位置上，随机取几个点或区域。通过计算相邻图像上相同位置上各点的方差、均值及变异系数来判断热像仪的输出值是否稳定。变异系数用来比较两组数据离散程度。期望： $E_x=\frac{1}{n}\sum_{i=1}^nx_i$ ，方差：

$$\sigma_x=\sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^n\left(x_i-E_x\right)^2}$$
，变异系数： $V_x=\frac{\sigma_x}{E_x}$ 。本文中

取  $n=3$ ，从图 5 中可以看出当左右聚焦程度基本一致时，此时热像仪的输出也保持稳定。

表 3 评价指标 Table 3 Evaluation indicators

|               |         |        |        |         |         |         |
|---------------|---------|--------|--------|---------|---------|---------|
|               | Data 1  | Data 2 | Data 3 | Data 4  | Data 5  | Area    |
| Clarity ratio | 1.386   | 1.4947 | 1.3788 | 1.4779  | 1.3353  | 1.3631  |
| Sensibility   | 0.0007  | 0.0021 | 0.0003 | 0.0002  | 0.0006  | 0.0004  |
| Wave momentum | 33.5062 | 30.32  | 46.234 | 37.3343 | 27.5363 | 40.6235 |

表 4 不同聚焦程度下热像仪输出数据差分值

| Data   | 1   | 2   | 3   | 4   | 5   | 6  | 7  | 8 | 9 | 10  | 11  | 12  | 13  | 14  |
|--------|-----|-----|-----|-----|-----|----|----|---|---|-----|-----|-----|-----|-----|
| Data 1 | 329 | 281 | 236 | 77  | 73  | 31 | 7  | 1 | 2 | 70  | 98  | 127 | 167 | 365 |
| Data 2 | 333 | 346 | 358 | 136 | 160 | 68 | 21 | 2 | 4 | 3   | 133 | 483 | 615 | 580 |
| Data 3 | 309 | 310 | 274 | 32  | 98  | 21 | 2  | 7 | 8 | 84  | 51  | 178 | 416 | 464 |
| Data 4 | 347 | 289 | 288 | 94  | 164 | 75 | 14 | 3 | 1 | 138 | 158 | 225 | 318 | 539 |
| Data 5 | 345 | 320 | 187 | 44  | 46  | 7  | 1  | 9 | 6 | 50  | 38  | 45  | 149 | 456 |

表 5 为各张图像与其相邻两张随机选取的 5 个位置不同的点,所求出的变异系数。从表 5 中数据分析可以发现当所采集到的图像聚焦时,其对应输出值的变异系数变小。而当热像仪获取的图像变得离焦时,其所得的变异系数变大。同理,随机选取的区域可看成相邻点构成的集合,当区域内方差达到最小时各个点的输出值趋于一致。所以在对均匀物体探测时,可以在其表面随机选取几个点及区域通过判断随机点的变异系数及区域内输出值的方差来对热像仪输出值稳定性进行判别。热像仪在获取到聚焦图像的状态下,其输出值比较平稳。

表 5 在不同聚焦状态下各随机点的变异系数

| Data/Image focus | 0.52   | 0.59   | 0.7    | 0.86   | 0.9    | 0.92   | 0.95   | 0.97   | 1      |
|------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Data 1           | 0.0527 | 0.0493 | 0.0378 | 0.0330 | 0.0237 | 0.0094 | 0.0090 | 0.0075 | 0.0028 |
| Data 2           | 0.0549 | 0.0596 | 0.0529 | 0.0511 | 0.0386 | 0.0179 | 0.0193 | 0.0166 | 0.0065 |
| Data 3           | 0.0508 | 0.0508 | 0.0456 | 0.0409 | 0.0245 | 0.0096 | 0.0138 | 0.0089 | 0.0016 |
| Data 4           | 0.0571 | 0.0545 | 0.0420 | 0.0402 | 0.0302 | 0.0151 | 0.0200 | 0.0175 | 0.0068 |
| Data 5           | 0.0532 | 0.0526 | 0.0414 | 0.0301 | 0.0175 | 0.0065 | 0.0066 | 0.0040 | 0.0005 |
| Data/Image focus | 0.98   | 0.97   | 0.96   | 0.93   | 0.91   | 0.87   | 0.82   | 0.76   | 0.6    |
| Data 1           | 0.0006 | 0.0031 | 0.0031 | 0.0055 | 0.0118 | 0.0160 | 0.0214 | 0.0407 | 0.0448 |
| Data 2           | 0.0018 | 0.0011 | 0.0014 | 0.0003 | 0.0107 | 0.0468 | 0.0845 | 0.1004 | 0.0793 |
| Data 3           | 0.0007 | 0.0063 | 0.0067 | 0.0063 | 0.0059 | 0.0170 | 0.0444 | 0.0675 | 0.0729 |
| Data 4           | 0.0013 | 0.0071 | 0.0070 | 0.0112 | 0.0210 | 0.0279 | 0.0410 | 0.0688 | 0.0636 |

4 结论

通过实验结果可以看出热像仪的聚焦程度对其输出值影响比较大。如果使用其在不稳定状况下的输出值进行温度计算,会进一步对所测物体温度数值准确性产生影响。所以在对热像仪聚焦程度进行检测的同时,可以应用此方法对热像仪的输出值作进一步的判断。这样可以得到热像仪稳定的输出,减小因为输出不稳定所带来的误差,从而提高热像仪测温精度。应用变异系数与区域方差的方法可以快速有效地判别出热像仪输出的值是否稳定。

参考文献:

[1] 孙禹,蔡静. 目标距离变化对热像仪测温精度影响分析[J]. 计测技术, 2016(5): 5-8.  
SUN Yu, CAI Jing. Analysis of influence of distance on temperature measurement accuracy of infrared thermal imagers[J]. *Metrology & Measurement Technology*, 2016(5): 5-8.

[2] 赵晨阳,冯浩,黄晓敏. 红外测温技术在爆炸场温度测试中的精度研究[J]. 红外技术, 2014, 36(8): 676-679.  
ZHAO Chenyang, FENG Hao, HUANG Xiaomin. Research on the precision of the infrared temperature-measuring technology in explosion fields temperature test[J]. *Infrared Technology*, 2014, 36(8): 676-679.

[3] 苏佳伟,石俊生,汪炜韬. 距离对红外热像仪测温精度影响及提高精度的实验研究[J]. 红外技术, 2013, 35(9): 587-590.  
SU Jiawei, SHI Junsheng, WANG Weise. Experimental study of infrared thermal imagers about influence of distance for temperature measurement accuracy and method of improving accuracy[J]. *Infrared Technology*, 2013, 35(9): 587-590.

[4] 郭帮辉,黄剑波,王志,等. 目标距离和视场角变化对红外热像仪测温精度影响的理论分析[J]. 长春理工大学学报:自然科学版, 2011(1): 16-19.  
GUO Banghui, HUANG Jianbo, WANG Zhi, et al. Analysis of effections on the precision of temperature measurement using infrared thermal

imaging system with the change of object distance and field[J]. *Journal of Changchun University of Technology: Natural Science Edition*, 2011(1): 16-19.

[5] 张健,杨立,刘慧开. 环境高温物体对红外热像仪测温误差的影响[J]. 红外技术, 2005, 27(5): 419-422.  
ZHANG Jian, YANG Li, LIU Huikai. Effect of environmental object on infrared temperature measurement[J]. *Infrared Technology*, 2005, 27(5): 419-422.

[6] 张勇,王新赛,贺明. 距离对红外热像仪测温精度的影响及误差修正[J]. 红外, 2011(2): 24-27.  
ZHANG Yong, WANG Xinsai, HE Ming. Influence of distance on temperature measurement accuracy of infrared thermal imager and error correction[J]. *Infrared*, 2011(2): 24-27.

[7] 刘兴宝,袁道成. 基于纹理分析的小波变换图像清晰度评价方法研究[J]. 仪器仪表学报, 2007(8): 1508-1513.  
LIU Xingbao, YUAN Daocheng. Research on image definition criterion using wavelet transform based on the texture analysis[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2007(8): 1508-1513.

[8] 翟永平,周东翔,刘云辉,等. 聚焦函数性能评价指标设计及最优函数选取[J]. 光学学报, 2011(4): 242-252.  
DI Yongping, ZHOU Dongxiang, LIU Yunhui, et al. Design of evaluation index for auto-focusing function and optimal function selection[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011(4): 242-252.