

〈红外应用〉

基于红外热像的行人面部温度高精度检测技术

袁浩期, 李 扬, 王俊影, 刘 航

(广东工业大学 机电工程学院, 广东 广州 510006)

摘要: 针对复杂环境下运动物体的表面温度测量, 实现了一种基于热红外图像与可见光图像相结合的物体表面温度检测方法。首先在可见光图像下检测运动物体的感兴趣区域, 在仿射变换的基础上实现一种修正方法实现图像的精确配准, 实时地将可见光图像的感兴趣区域映射到热红外图像上。然后对热红外图像进行图像运算, 最终获取运动物体特定区域的温度。以行人的脸为研究对象, 实验结果表明, 对非正面、轻微遮挡的人脸有较高的准确率, 并且能快速地检测特定运动对象的表面温度, 该方法测量误差在 0.2℃ 内, 基本能满足在密集场合下快速筛选运动物体表面温度的要求。

关键词: 面部温度; 运动物体; 热红外图像; 人脸检测; 图像配准;

中文分类号: TP391 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-8891(2019)12-1181-06

High Precision Detection Technology of Pedestrian Face Temperature Based on Infrared Thermal Imaging

YUAN Haoqi, LI Yang, WANG Junying, LIU Hang

(Faculty of Information Engineering, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006, China)

Abstract: In order to measure the surface temperature of moving objects in complex environments, a method based on the combination of thermal infrared image and visible light image is proposed in this paper. Firstly, the ROI of moving object is detected in the visible image, and a correction method is implemented based on affine transformation to achieve accurate registration of the image. Then the thermal infrared image is calculated and the temperature of the specific area of the moving object is finally obtained. In this paper, pedestrian face is taken as the research object. The experimental results show that the method has high accuracy for non-frontal and slightly occluded faces, and can quickly detect the surface temperature of specific moving objects. The measurement error of this method is within 0.2, which can basically meet the requirements of fast screening the surface temperature of moving objects in dense occasions.

Key words: facial temperature, moving object, thermal infrared image, face detection, image registration

0 引言

对于运动物体表面的温度检测, 普遍都是通过人工手持热红外测温仪跟踪被测目标来实现的。由于热红外测温仪需要与被测物保持较近的距离, 在复杂环境下运动的物体, 难以快速、准确地测量物体表面温度。对于复杂环境下运动的物体, 基于热红外图像分析难以准确地判断物体是否为待测对象, 因此需要设计一套自动识别特定对象的热红外测温系统, 准确地检测被测物体并提取物体表面温度。目标检测技术和

红外热像的信息融合即可满足这样的要求^[1]。

选用行人的脸为研究对象, Viola 和 Jones 等人^[2]提出基于 Adaboost 的方法, 以及基于 Adaboost 的改进算法如 HeadHunter 和 SURF- Adaboost^[3]算法。这些传统方法在多尺度多姿态问题上, 存在计算量大、检测精度不高的缺点。随着神经网络的快速发展, Wu 等人^[4]针对人脸姿态多样性问题设计出一种使用漏斗型级联结构的人脸检测算法, 也存在一定的漏检、误检。采用一种级联的深度网络实现对可见光图像多姿态被测区域(人脸)进行定位检测, 有助于提高人脸

收稿日期: 2018-11-22; 修订日期 2018-12-19.

作者简介: 袁浩期(1994-), 男, 广东汕头人, 硕士生, 主要研究方向为图像处理, 目标识别。E-mail: 474492164@qq.com.

检测精度。

可见光与热红外摄像头物理参数的不同导致彩色图像与热红外图像之间存在视差偏移。St-Laurent L.^[5]提出一种基于热谱标定的校准方法，通过参数可变的投影矩阵，对远距离上的对象配准，但针对距离变化的运动物体，配准误差较大。因此一种自适应的可见光与热红外空间位置校正方法，是消除运动物体相对摄像头不同位置产生的配准误差的关键。

提出了一种运动物体表面温度测量方法。该系统采用热红外与可见光双目摄像头，首先在可见光图像中识别运动目标，然后对可见光与热红外图像进行配准，将可见光下被测区域映射到热红外图像中，并在热红外图像中提取感兴趣区域温度，并进行温度校正。

1 物体表面温度检测方法

以流动人群的人脸为特定对象，设计的运动物体表面温度测量方法包括以下几个环节：人脸检测、图像配准、温度提取、温度校正。

1.1 人脸检测

为了实现高精度、低成本的多视点人脸特征提取方案，结合一种经典级联结构和多层神经网络的人脸检测方法实现^[6]，在顶部采用局部采样器，扩大人脸检测框的感受野，有效地引入图片内容的上下文信息，紧接着由多个针对不同姿态的快速 LAB (locally assembled binary) 级联分类器构成，然后由若干个基于 SURF (speeded-up robust features) 特征的多层感知机 MLP (multi-layer perceptron) 级联结构，最后由一个统一的 MLP 级联结构 (同样基于 SURF 特征) 来处理所有姿态的候选窗口，整体上呈现出上宽下窄的漏斗形状。从上往下，各个层次上的分类器及其所采用的特征逐步变得复杂，从而可以保留人脸窗口并排除越来越难与人脸区分的非人脸候选窗口。人脸检测级联结构如图 1 所示。

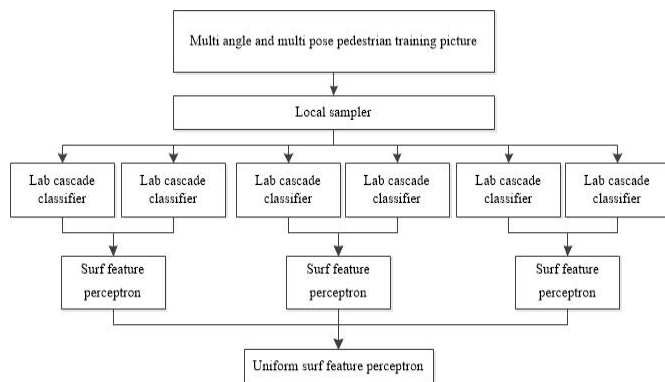


图 1 人脸检测级联结构

Fig.1 Cascade structure of face detection

实时人脸检测中，对于一幅大的图像需要借助局部采样器，对大量的候选窗口进行检查，增加候选窗口的感受野，提高小尺寸的检测精度。例如，在 640 × 480 图像上检测尺寸大于 20 × 20 的人脸，需要检查超过一百万个窗口。因此，需要快速 LAB 级联分类器层在最短时间内筛选出可能包含人脸的少量窗口。在 LAB 级联的阶段之后，大多数非工作面窗口被丢弃，剩下的候选窗是由更复杂的分类进一步验证，即 MLP 与 SURF。为了避免施加太多的计算成本，利用小的网络来执行更好。最后利用一个单一的 MLP 级联后，保留下最终的人脸候选窗口。

1.2 图像配准

通过分析红外与可见光得到的对同一目标的两幅图像，两幅图像间有明显的尺度、旋转和平移变换。基于空间位置变换的图像配准方法^[7]，仿射变换的模型可以表示为式(1)：

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中：(x,y)和(x',y')分别是两幅图像中对应点的坐标。式中的 6 个参数向量为两幅图像坐标之间的转换关系，只需要 3 对点即可确定 6 个参数。当方程数超过未知数的数量时，可以通过最小二乘法取得最佳解。假设在可见光与热红外图像中选取对应的匹配点为 (x_i,y_i)和(x'_i,y'_i)，如式(2)所示：

$$\begin{cases} Ax = x \\ By = y' \end{cases} \quad (2)$$

图像配准需要求解的是最小二乘解 A 和 B，其中 A 和 B 为仿射变换的参数，A=(a₁₁,a₁₂,b₁)，B=(a₂₁,a₂₂,b₂)。因此可以选取多个匹配点对，利用最小二乘法来寻找一个最佳解来使所有方程的均方误差最小，达到用多个配准点拟合最优参数解的目的。获得配准参数估计后，就可以将图像作相应的几何变换。

当成像传感器与被测物之间的距离相当大时，可以忽略物体的景深，将场景近似看作平面，可以将可见光图像与热红外图像近似看作仿射变换关系^[8]。当运动物体与成像传感器距离较近时，需要有一种自适应的可见光与热红外图像的空间位置校正方法。由于仿射变换的图像配准效果，受被拍摄物与相机之间的距离影响，其中双目成像原理如图 2 所示。

假设 h₀ 和 h 分别表示像素坐标下近距离被测人脸的像素高度以及远 (基准) 距离人脸的像素高度，X₀ 和 X 分别表示像素坐标下近距离人脸的位置以及远 (基准) 距离人脸的位置，L₀ 和 L 分别表示世界坐标

下近距离人脸的距离以及远(基准)距离人脸的距离。根据比例关系可得式(3):

$$X_0 = \frac{h - h_0}{h} X \quad (3)$$

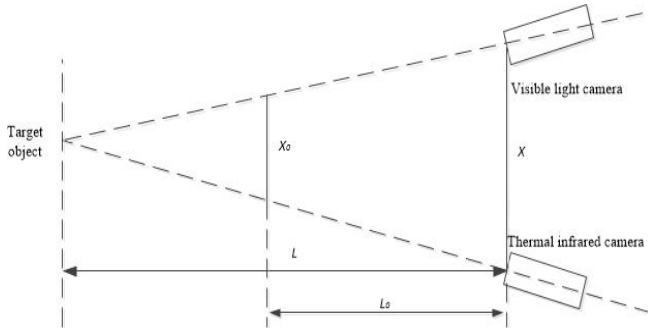


图2 双目成像

Fig.2 Binocular imaging

因此,在空间变换模型基础上提出一种校正方法,解决运动物体与成像摄像头不同距离时的配准问题。

1.3 温度提取

实际场景中,可能出现因着装不同遮挡部分感兴趣区域,导致遮挡部分温度明显低于正常温度值,使得最终提取到的感兴趣区域的温度值出现较大偏差。

对于感兴趣区域,不能直接对面部区域内的每个像素点获取温度并计算平均值。针对感兴趣区域,利用 \$5 \times 5\$ 的模板对热红外图像运算,如式(4)所示:

$$y(i) = \sum_{i \in D} x(i) f(i) \quad (4)$$

式中: \$x(i)\$ 表示热红外图像中像素点对应的温度值; \$f(i)\$ 表示函数代表滑窗内温度值的众数; \$y(i)\$ 表示运算后热红外图像中像素点的温度值; \$D\$ 表示滑窗内满足条件的像素点。

该感兴趣区域温度提取的算子,首先遍历感兴趣区域的每个像素点,计算区域内的平均温度,并剔除温度低于平均温度的像素点,计算感兴趣区域的温度点的众数,代表感兴趣区域的温度。该温度提取方法,可以有效地避免因头发或者帽子遮挡面部感兴趣区域,造成局部温度低于正常值的问题。

1.4 温度校正

提取被测区域温度后,需要对该区域进行温度校正。主要包括以下几个部分: ①外置黑体校正; ②距离校正。

1.4.1 外置黑体校正

红外探测器探测到的红外辐射包括空气温湿度、气流、周边环境物体产生的红外辐射等,所以在实际使用一段时间后,在环境温度过高或过低的地方进行温度测量,会产生温度漂移^[9]。因此需要使用外置黑体进行温度校正,外置黑体温度校正系数如式(5)所示:

$$k = T_0 / T \quad (5)$$

式中: \$k\$ 为温度校正系数; \$T_0\$ 为外置黑体的设定绝对温度; \$T\$ 为外置黑体被测的绝对温度。

外置黑体是一个恒定不变的温度源,可以保证系统测量温度的稳定性,降低系统长期运行带来的测量误差。实际使用时,将外置黑体悬挂在视野的正前方,将其温度设定为 \$37^\circ\text{C}\$,校正环境温度。

1.4.2 距离校正

当外置黑体温度固定为 \$38^\circ\text{C}\$ 时,系统与被测物的距离对温度的曲线^[10-11],如图3所示,当被测温物体距离摄像头在 \$15\text{ m}\$ 以内近距离测温时,物体的表观温度随测试距离增大而非线性变化;当测试距离达到 \$15\text{ m}\$ 以后,距离的变化基本对测温没有什么影响,测量温度与实际温度的插值恒定,但是由于系统与被测物的距离太远,难以对图像特征提取,无法对运动物体实时跟踪。当被测温物体距离摄像头在 \$5\text{ m}\$ 的距离时,测量距离近似等于外置黑体设定的温度值。当被测物体距离摄像头在 \$4 \sim 6\text{ m}\$ 的距离时,温度变化曲线可以近似为线性曲线。

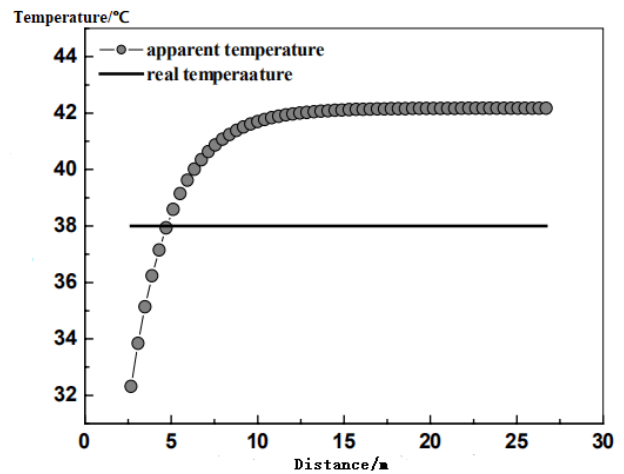


图3 测量距离对测温精度的影响

Fig.3 Influence of measurement distance on temperature measurement accuracy

因此将测温距离选取在 \$4 \sim 6\text{ m}\$ 的范围,并将外置黑体安装在测温距离 \$5\text{ m}\$ 的位置进行外置黑体校正。首先统计基准距离(即 \$5\text{ m}\$ 处)运动人体的面部矩形框大小,然后根据测温距离范围内运动物体的面部矩形框大小,构建分段线性模型对运动物体进行距离校正。

2 测温系统设计

2.1 硬件设计

系统的前端采集,使用组合式双目摄像头,其中可见光摄像头分辨率为 \$1280 \times 960\$,热红外摄像头分

分辨率 640×480。系统整体搭建包括多路网络摄像头，通过网络实时传输到后台服务器上，通过一系列的图像处理过程快速提取人体温度。

由于系统的特殊性，前端采集系统及黑体的安装位置需要特别注意。由于热红外图像测温对距离比较敏感，为避免捕捉到被测距离 4~6m 外的人体，选用没有自动调焦功能的红外探测器，它的探测视角为 15°，最佳探测距离在 5m。同时我们还要考虑到人群遮挡的问题，我们的系统需要保证探测到正面人脸。现场安装图如图 4 所示。

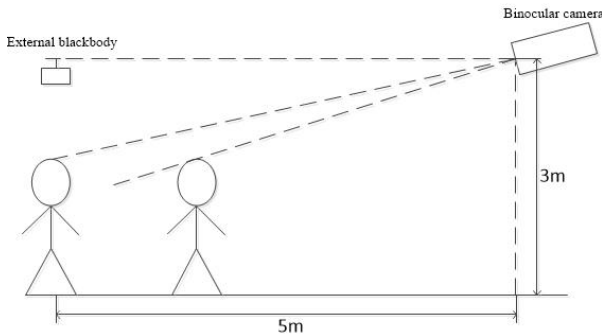


图 4 系统安装位置示意图

Fig.4 Schematic diagram of system installation location

2.2 软件设计

整个系统处理流程如图 5 所示，对可见光视频帧进行图像预处理，通过特征提取确定行人的人体脸部矩形框。将热红外图像与可见光图像的分辨率统一，利用图像配准得到热红外图像中的热红外图像中的脸部矩形框。设计温度提取的算子，提取表面温度。对提取到的温度进行距离校正、外置黑体校正，最终得到运动物体表面温度，快速提取人体的体温。

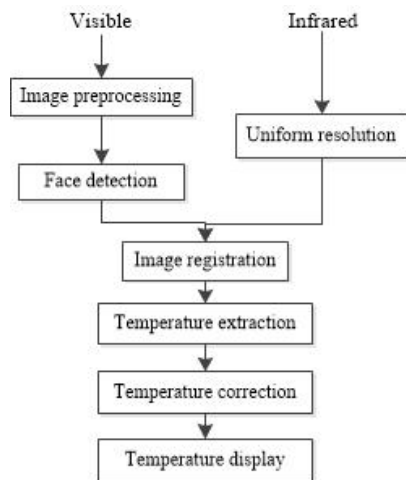


图 5 人群测温系统软件流程图

Fig.5 Software flow chart of the crowd temperature measurement system

3 实验结果与分析

3.1 人脸检测测试

为了测试人脸检测模块的检测精度与速度，实验针对实际场景，分别对多段运动的行人视频进行人脸检测，得到其平均检测准确率和检测速度。在 CPU 为 i7-6700HQ，RAM 为 8G 的硬件平台上，实验视频的帧率为 40 帧/s，每一帧图像的大小为 1280×960，取 500 帧图片共计 1968 张人脸，计算 Adaboost、Cascade CNN、FuSt 和本文算法的人脸检测率，如式(6)所示：

$$P = N/M \quad (6)$$

式中：P 为人脸检测率；N 为图像中正确检测的人脸数；M 为图像中总共的人脸数。表 1 为传统算法和本文算法的效率对比。

表 1 人脸检测效果对比

Table 1 Comparison of face detection effectiveness

Algorithm	Number of faces detected	Face detection rate/%	Detection speed/ms
Adaboost	1559	79.22	>300
Cascade CNN	1677	85.21	>105
FuSt	1736	88.21	>63
Algorithm in this paper	1762	89.53	>57

Adaboost 和 Cascade CNN 算法缺少对多角度多姿态人脸图片的识别，所以人脸检测精度不高。FuSt 算法对全局图像的采样过程消耗较多的时间。

本文算法扩大人脸检测框的感受野，有效地引入图片内容的上下文信息，提高人脸检测率。如图 6 所示的人脸检测效果，其中(a)为正面图，(b)为侧面图，可以看出在人体面部存在部分遮挡、以及较大角度的侧面图中，该算法都能准确检测人脸。采用局部窗口采样器有效地过滤人脸检测窗口，缩短检测时间，提高检测速度。



(a) 正面 (b) 侧面
(a) The front (b) The side

图 6 人脸检测效果图

Fig.6 The effect map of face detection

3.2 图像配准测试

根据 1.2 节提出的基于空间位置变换的图像配准方法,首先在可见光与热红外图像中选取多组匹配点,利用最小二乘法拟合求得最优解,将可见光图像中的人脸检测框映射到热红外图像中。

图 7 为在基准平面(远距离)内选取多组匹配点,利用仿射变换的最小二乘法拟合得到效果图,配准之后误差在 1 个像素。因为当两个成像传感器与被拍摄物之间的距离相当大时,可以忽略物体的景深,将场景近似看作平面,两个不同的成像传感器可以很好地近似为仿射变换关系。但是在实际场景中,行人不可能停留在基准焦平面上,当行人走近后对同一目标的两幅图像在配准之后会产生较大的偏移量,如图 8 所示。



图 7 远距离配准效果图

Fig.7 The effect map of long-distance registration



图 8 近距离配准效果图

Fig.8 The effect map of short-distance registration

根据 1.2 节公式(3)的位置关系进行图像配准校正,得到热红外图像的人脸检测框,如图 9 所示。



图 9 图像配准校正效果图

Fig.9 The effect map of image registration correction

通过实验对图像配准校正进行校正偏差分析,实验采用的组合式双目摄像头,其基线距离为 65 mm。在不同成像距离下采集多组图片,可见光图像的大小为 1280×960,热红外图像的大小为 640×480。比对并计算不同成像距离下,图像配准校正前后的平均像素偏差,测试结果如表 2 所示。

通过实验数据,发现当运动物体走近后图像配准校正前的像素误差呈非线性快速增长。经图像配准校正后的可见光与热红外图像像素误差在 1~2 个像素,可以准确地将可见光图像的脸部矩形框投射到热红外图像中的矩形框,进而可以在热红外图像中提取相应位置脸部矩形框的温度。

表 2 不同成像距离处图像配准偏差数据

Table 2 Image registration bias data at different imaging distances

Imaging distance/m	Average deviation before correction/pixel	Average deviation after correction/pixel
1	28	2
2	17	2
3	9	1
4	4	1
5	2	1
6	1	0

3.3 温度检测方法整体测试

利用深度级联的网络模型,快速检测人脸区域,在空间变换模型的基础上提出一种图像配准的校正方法,快速的匹配可见光与热红外图像。通过设计热红外图像温度提取算子,并对温度进行校正。基本达到准确提取人体体温的要求。

实验在视频窗内选取一个人(实际测量温度为 37.0℃),由远及近,从左至右移动,记录下该人不同位置下测量到的表面温度,如表 3 所示。

表 3 不同位置处行人的表面温度实验数据

Table 3 Experimental data of pedestrian surface temperature at different locations

Number of temperature measuring point	surface temperature /°C	Number of temperature measuring point	surface temperature /°C
1	37.0	7	37.2
2	37.1	8	37.1
3	37.3	9	37.0
4	37.0	10	37.1
5	36.9	11	36.9
6	37.1	12	36.8

通过做多组实验,计算得到平均值为 37.04°C ,标准差为 0.13°C 。因此该方法测量人体体温误差在 0.2°C 内,能满足在密集场合下快速筛选运动物体表面温度的要求。

4 结论

对于复杂背景环境下运动物体的表面温度检测问题,实现一种基于热红外图像与可见光视频图像相结合的物体表面温度检测方法。首先在可见光图像下检测感兴趣区域,并在仿射变换的基础上提出一种图像配准方法,实时将可见光图像的感兴趣区域映射到热红外图像上,在热红外图像上获取特定区域的温度。以行人人脸为检测对象进行研究,在实际场景下能快速的检测特定运动对象的表面温度。

该运动物体表面温度检测方法,提高多角度检测人脸的准确率,并且在仿射变换基础上的图像校正方法能有效地解决运动物体配准问题。对于热红外图像的温度校正,还需更加深入研究存在的其他影响因素,提高运动物体表面温度检测精度。

参考文献:

- [1] 王华伟. 基于红外热成像的温度场测量关键技术研究[D]. 西安: 中国科学院研究生院(西安光学精密机械研究所), 2013.
WANG Huawei. Research on Key Technologies of Temperature Field Measurement Based on Infrared Thermal Imaging[D]. Xi'an: Graduate School of Chinese Academy of Sciences (Xi'an Institute of Optical Precision Machinery), 2013.
- [2] Girshick R, Donahue J, Darrell T, et al. Rich feature Hierarchies for accurate object detection and semantic segmentation[C]// *IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, 2014: DOI: 10.1109/CVPR.2014.81.
- [3] 廖红文, 周德龙. AdaBoost 及其改进算法综述[J]. *计算机系统应用*, 2012, **21**(5): 240-244.
LIAO Hongwen, ZHOU Delong. A survey of AdaBoost and its improved Algorithms[J]. *Computer System Applications*, 2012, **21**(5): 240-244.
- [4] WU Shuzhe, KAN M, SHAN Shiguang, et al. Funnel structured cascade for multi-view face detection with alignment-awareness[J]. *Neurocomputing*, 2016, **221**(C): 138-145.
- [5] St-Laurent L, Prévost D, Maldague X. Fast and accurate calibration-based thermal/colour sensors registration[C]// *2010 Conference of Quantitative InfraRed Thermography*, 2010: DOI: 10.21611/qirt.2010.126.
- [6] LI J, ZHANG Y. Learning SURF cascade for fast and accurate object detection[C]//*IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, 2013: 3468-3475.
- [7] 杨钊, 钱立志, 刘晓, 等. 红外与微光图像开窗配准融合处理方法[J]. *激光与红外*, 2018, **48**(8): 1060-1064.
YANG Fan, QIAN Lizhi, LIU Xiao, et al. The method of window registration fusion for infrared and low-light-level images[J]. *Laser and Infrared*, 2018, **48**(8): 1060-1064.
- [8] 陶冰洁, 王敬儒, 张启衡. 采用仿射变换的红外与可见光图像配准方法[J]. *光电工程*, 2004(11): 39-41.
TAO Bingjie, WANG Jingru, ZHANG Qiheng. Infrared and visible image registration using affine transformation[J]. *Photoelectric Engineering*, 2004(11): 39-41.
- [9] 刘会通, 易新建, 刘靖, 等. 红外焦平面阵列基于黑体的非均匀性校正方法中的限制因素[J]. *红外技术*, 2003, **25**(3): 41-44.
LIU Huitong, YI Xinjian, LIU Jing, et al. Limitation factors in blackbody-based nonuniformity correction methods for infrared focal plane arrays[J]. *Infrared Technology*, 2003, **25**(3): 41-44.
- [10] 陆子凤, 潘玉龙, 王学进, 等. 目标到测试系统距离对红外测温精度的影响[J]. *红外技术*, 2008(5): 271-274, 278.
LU Zifeng, PAN Yulong, WANG Xuejin, et al. Influences of target-to-test system distance on infrared temperature measurement accuracy[J]. *Infrared Technology*, 2008(5): 271-274, 278.
- [11] 陆子凤. 红外热像仪的辐射定标和测温误差分析[D]. 长春: 中国科学院研究生院(长春光学精密机械与物理研究所), 2010.
LU Zifeng. Radiation calibration and temperature measurement error analysis of infrared thermal imager [D]. Changchun: Graduate School of Chinese Academy of Sciences (Changchun Institute of Optical Precision Machinery and Physics), 2010.