

非制冷红外热像仪人体表面温度场测量及误差修正

张晓晔, 徐超, 何利民, 陈一鹤

(北京理工大学光电学院“光电成像技术与系统”教育部重点实验室, 北京 100081)

摘要: 利用非制冷红外热像仪测量人体表面温度场, 除具有快速、非接触和量程短等特点外, 还对测温精度有较高要求。针对非制冷微测辐射热计热像仪测量精度受环境、机芯温度影响较大的问题, 提出一种对热像仪使用温度与标定温度之差引起的测量误差进行修正的方法。即对分别测得的环境温度、机芯温度和灰度两组数据, 由支持向量机拟合得到环境温度和机芯温度误差修正模型; 实际测量时, 分别由热电偶和置于热像仪中的传感器测得环境温度和机芯温度后, 根据误差修正模型对环境温度和机芯温度变化引起的热像仪测量误差进行修正, 获得较为准确的人体表面温度场数据。实验结果表明: 该修正方法, 与经标定的高精度热电偶测温相比, 可使测量距离 2 m 时的测温误差减小 50%。

关键词: 非制冷红外热像仪; 体表温度场; 环境温度; 机芯温度; 误差修正

中图分类号: TN219 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201645.1004003

Temperature field of body surface measurement by uncooled infrared thermal imager and error correction

Zhang Xiaoye, Xu Chao, He Limin, Chen Yihe

(Key Laboratory of Photo-electronic Imaging Technology and System, Ministry of Education, School of Optoelectronics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

Abstract: Measure body surface temperature with uncooled infrared thermal imager has many features such as fast, non-contact, short scope of measurement and higher accuracy requirement. But temperature of core and environment will interfere the accuracy of micro-bolometer to a great degree. A new method was proposed to correct temperature error caused by the difference of temperature between calibration and measurement. The data of core temperature, environment temperature and grayscale were measured and recorded, and then error correction parameter was calculated by using SVM. In the course of measurement, the environment temperature and core temperature were obtained with thermocouple and sensor in micro-bolometer, and then error correction of environment temperature and core temperature were finished by error correction parameter. By this way more accurate data of human body surface temperature field were gained. Experimental results shows that the error of new corrected method can be decreased at least 50% when the distance of measurement is about 2m, compared with thermocouple of high precision which had been calibrated.

Key words: uncooled infrared thermal imager; body surface temperature field; environment temperature; core temperature; error correction

收稿日期: 2016-02-11; 修订日期: 2016-03-18

基金项目: 兵器预研支撑基金(62201070116); 北京理工大学基础研究基金(20130442012);

“光电成像技术与系统”教育部重点实验室 2015 开放基金(2015OEIOF04)

作者简介: 张晓晔(1990-), 女, 硕士生, 主要从事光电成像系统设计方面和 FPGA 算法开发方面的研究。Email: bitzhangxiaoye@163.com

通讯作者: 徐超(1979-), 男, 讲师, 博士, 主要从事光电图像处理 and 光电成像技术与系统方面的研究。Email: rockyxu@bit.edu.cn

0 引言

早在 20 世纪 60 年代热成像技术就被用于人体体表温度的测量,随着热成像技术的不断进步,现已被广泛用于耳朵、脖子、脸颊和手掌等大片体表温度测量的研究中。与传统的体温测量设备相比,应用热成像技术检测体表温度场^[1]具有快速,便捷,非接触和非入侵性等优点,尤其是大型流行病爆发时,可快速发现温度异常的个人^[2],从而减少疫情的传播。如 SARS 流行期间,台北医科大学万芳医院应用制冷型红外热像仪检测进出医院人群的体温,以便及时发现温度异常的个人^[3]。

近年来,随着非制冷型红外热像技术的发展,其功耗低、工作寿命长、价位低、体积小和操作简单等优点^[4]使之被广泛应用于医学领域。其中,微测辐射热计在温度场测量中发挥着越来越大的作用,如 FLIR 公司的 TG165、FLIR T420 & T440 和 FLIR A655sc 等非制冷微测辐射热计红外热像仪,高德红外专门用于医疗检疫的 EsaIR 9 高端工具型热像仪(见图 1),大立科技的 T8 热像仪,FLIR A655sc 热像

热像仪的测量精度为 1.5°C 以下(见表 1)。鉴于人体表面温度场测量,与工业应用方面的温度场测量相比具有量程小、测温精度要求高的特点,为提高非制冷微测辐射热计的测量精度,常用的修正环境温度方法主要是开机前遮挡镜头盖,采集一帧镜头盖的灰度值作为环境温度的响应,在后续测量中都减去这个灰度值来修正环境温度的影响。上述补偿方法在每次测量前都需要挡镜头盖进行校正,而且挡镜头盖的实质是用镜头盖近似标定时的黑体,镜头盖和标定时所用黑体的发射率不同也会引入测量误差。



图 2 FLIR A655SC 热像仪拍摄人体脚部温度场

Fig.2 Foot surface temperature field of FLIR A655sc thermal imagery

表 1 国内外典型微测辐射热计测温精度

Tab.1 Accuracy of temperature measurements of microbolometer at home and abroad's famous company

Type	NETD	Measurement accuracy	Resolution
TG165	150 mK	±1.5 °C or ±1.5% of reading	80×60
T420&T440	45 mK	±2 °C or ±2% of reading	320×240
FLIR A655sc	<30 mK	±2 °C or ±2% of reading	640×480
EsaIR 9	800 mK	±2 °C or ±2% of reading	384×288
T8	40 mK	±2 °C or ±2% of reading	384×288



图 1 FLIR TG165 (a)和 EsaIR 9 红外热像仪(b)

Fig.1 TG165(a) and EsaIR 9 infrared thermal imagery(b)

仪拍摄脚部温度场分布见图 2。但由于非制冷微测辐射热计热像仪的测温精度与热像仪的工作温度密切相关^[5]。此外当近距离测量不考虑大气影响且被测物接近灰体时,红外热像仪获取的被测物真实温度受环境高温物体温度、环境高温物体同被测物之间的位置、环境温度等的影响^[6],导致实际的测温精度较低。例如 FLIR TG165 等非制冷微测辐射热计

为此,文中从无 TEC 的微测辐射热计的工作特性出发,考虑热像仪机芯温度和环境温度对红外测温过程的影响,提出一种采用更高精度的拟合方法获得环境和机芯温度误差,对热像仪测温结果进行补偿的方法。由于未来非制冷红外热像传感器的主流为非制冷微测辐射热计。因此,文中提出的方法在提高非制冷红外热像仪测温精度方面具有广泛的应用前景。为了描述方便,以下将非制冷微测辐射热计

热像仪简称为热像仪。

1 红外热像仪温度定标原理

自然界中,任何温度高于绝对零度的物体都会发出红外辐射,其辐射能量的大小由物体的温度及其辐射率决定。对于理想化的黑体辐射体,其辐射率等于 1,并且其辐射大小只取决于辐射波长及温度,与物体材料无关。由于黑体可视作朗伯辐射体,故黑体的辐射亮度为:

$$L_0(\lambda, T) = \frac{c_1}{\pi \lambda^5} \frac{1}{\exp(c_2/\lambda T) - 1} \quad (1)$$

对于实际物体,其辐射率小于 1,且与物体表面材料及性质有关。不同材料的物体,其辐射性能差异很大;对于不同温度和表面状况的同一物体,其辐射也不相同^[4],但通常可用比辐射率 ε 表示其差异,即实际物体的辐射亮度可分别表示为:

$$L_\lambda(\lambda, T) = \frac{\varepsilon c_1}{\pi \lambda^5} \frac{1}{\exp(c_2/\lambda T) - 1} \quad (2)$$

ε 在文中特指人体表面的辐射率。

Hardy 在 1934 年提出人体皮肤可近似视为黑体,辐射率为 0.98 ± 0.01 ^[2]。表 2 是 Steketees 1973 年测得的人体组织在 40 °C 的发射率^[7]。

表 2 人体组织发射率(40 °C)

Tab.2 Emissivity of human tissues at 40 °C

Measurement object	Emissivity
Black skin(3-12 μm)	0.98±0.01
White skin(3-14 μm)	0.97±0.02
Forehead skin(3-14 μm)	0.97±0.02
Burnt skin(3-14 μm)	0.98±0.01

红外热像仪测温,是通过测量被测物体表面发出的辐射能量来确定其表面温度的。所以人体表面的辐射亮度为^[8]:

$$L_\lambda = \varepsilon_\lambda L_0(T_0) + \rho_\lambda L_0(T_u) \quad (3)$$

式中: T_0 为人体表面温度; T_u 为环境温度; ε_λ 为皮肤辐射率; ρ_λ 为皮肤的反射率。

实际测量时,红外传感器接收的辐射量,除被测物体自身的辐射外,还有环境辐射、大气辐射,以及人体表面反射的环境辐射。红外热像仪接收的辐照度为^[9]:

$$E_\lambda = A_0 d^{-2} [\tau_{at} \varepsilon_\lambda L_0(T_0) + \tau_{at} (1 - a_\lambda) L_0(T_u) + \varepsilon_{at} L_0(T_a)] \quad (4)$$

式中: A_0 为红外热像仪最小空间立体角对应的目标

面积; d 为目标到探测器的距离;在一定条件下 $A_0 d^{-2}$ 为常量; a_λ 为人体对环境辐射的吸收率; τ_{at} 为大气的光谱透过率; ε_{at} 为大气辐射率。红外热像仪光学系统接收的某一波长辐射功率为^[10]:

$$P_{i\lambda} = E_\lambda A_r \quad (5)$$

式中: A_r 为探测器光学系统的面积。红外探测器接收的辐射为^[10]:

$$P_d = \tau_{op} P_{i\lambda} + P_{c\lambda} \quad (6)$$

式中: τ_{op} 为光学系统的透过率; $P_{c\lambda}$ 为入射到光学系统的杂散辐射。热像仪与辐射功率相对应的响应电压为 V_d :

$$V_d = P_d R_v \quad (7)$$

式中: R_v 为热像仪的光谱响应度。热像仪最终得到的信号电压为:

$$V_s = g(V_d + V_0) \quad (8)$$

式中: V_0 是为了使 V_d 达到平均视频信号水平而增加的直流电压; g 为电压信号的放大倍数。将公式(4)~(7)分别代入公式(8),并且令 $K = A_0 A_r d^{-2} \tau_{op} g$, $V(T) =$

$K \int_\lambda R_v L_\lambda(T) d\lambda$, 求得微测辐射热计与接收到的辐射功率对应的输出电压信号 V_s ^[11]:

$$V_s = \tau_a [\varepsilon_v(T_0) + (1 - \varepsilon) V(T_u)] + (1 - \tau_a) V(T_a) \quad (9)$$

式中: ε 和 τ_a 为探测器相应波段内人体的平均发射率和大气平均透过率。

由于红外传感器输出电信号与输入辐射成正比,所以热像仪输出的图像灰度值与电信号大小成正比: $G_0 = K_1 V_s + K_2$, 其中 K_1 和 K_2 分别为热像仪的系统增益和补偿。因此,可以由热像仪输出的灰度值推算出被测辐射体表面的温度。当近距离测量时,可忽略大气衰减的影响。令 $\tau_a = 1$ 就推导出了杨立、杨帧等提出的非制冷型微测辐射热计热像仪近距离测温模型^[12]:

$$G(T_i) = \frac{1}{\varepsilon} G_0 - \frac{1 - \varepsilon}{\varepsilon} G(T_u) \quad (10)$$

式中: G_0 为热像仪测得的灰度值; T_u 为测量时的环境温度; $G(T_u)$ 为由热像仪标定时测得的与环境温度 T_u 对应的灰度值。 T_i 为被测目标的真实温度; $G(T_i)$ 为由测温模型计算得到的,与被测温度 T_i 对应的灰度值。

公式(10)对 ε 求导得:

$$\frac{d(G(T_i))}{d\varepsilon} = \frac{1}{\varepsilon^2} (G(T_u) - G_0) \quad (11)$$

当被测目标为人体表面时,其辐射率变化量为 0.98 ± 0.01 ,由上式可知:辐射率变化对 $G(T_u)$ 的影响小于 $0.02157938 \times (G(T_u) - G_0)$ 。根据文中的热像仪标定结果:环境温度 T_u 对应的灰度值 $G(T_u)$ 和热像仪测得的灰度值 G_0 之差最大约为 270 (图像灰度为 14 bit),所以 $G(T_u)$ 的最大变化范围在 5~6 个灰阶范围,对人体温度测量结果的影响约为 0.1°C ,与国内外非制冷微测辐射热计热像仪 $1.5\sim 2^\circ\text{C}$ 的测量精度相比,影响很小。所以文中选择人体表面发射率为 0.98。

推导出公式(10)的前提是假设微测辐射热计热像仪的 R_v 为一个定值,实际响应度为^[8]:

$$R_v = V_b \frac{RR_v \alpha}{(R+R_L)^2} \frac{1}{g} \frac{1}{1+\beta \frac{R-R_L}{R+R_L}} \quad (12)$$

式中: V_b 为偏置电压; R_L 为负载电阻; g 为微测辐射热计的热导; α 为电阻温度系数; β 为热电参数; R 为微测辐射热计的电阻,与机芯温度有关,可记为 $R(T)$ 。因为 α 、 β 和 $R(T)$ 是温度的函数,当机芯温度变化时,热像仪的响应度会随之变化。而且,公式(10)的第二部分直接用热像仪标定曲线中黑体温度 T_u 对应的灰度值代替实际测量时热像仪对 T_u 的响应灰度,影响测温精度。考虑到环境温度和机芯温度的影响,非制冷型微测辐射热计近距离测温的修正模型为^[8]:

$$G'(T_u) = \frac{1}{\varepsilon} G_s(T) - \frac{1-\varepsilon}{\varepsilon} G_s(T_u) \pm \Delta G_c \quad (13)$$

式中: $G_s(T)$ 为热像仪在机芯温度为 T_c 时采集的被测目标灰度值; T_u 是实际测量时的环境温度; $G_s(T_u)$ 为热像仪在机芯温度 T_c 时采集的黑体温度为 T_u 的灰度值; ΔG_c 为实际测量时由机芯温度变化引起的热像仪测量灰度相对于标定时变化值。通过公式(13)可以修正机芯温度漂移和环境温度变化对测量精度的影响。

2 非制冷红外热成像温度定标方法

非制冷红外热成像温度标定的本质是建立黑体辐射量和采集黑体灰度值之间的关系。首先,进行非制冷微测辐射热计热像仪标定实验,得到非制冷微测辐射热计热像仪在不同温度点的响应灰度;然后在杨立、杨帧等人提出的公式(10)测温模型的基础上,提出修正由热像仪标定时和实际测量时环境温度变化而引入误差的方法:通过环境温度误差修正实验获得不同环境温度、热像仪机芯温度和热像仪

采集黑体的灰度值三类数据的 573 个样本,选用拟合精度更高的支持向量机拟合方法,求得温度误差修正参数。

文中在修正环境温度误差的基础上还修正机芯温度误差。测量时,记录微测辐射热计热像仪机芯温度稳定后的温度,根据拟合后的实验数据求得由机芯温度变化引起的温度误差值 ΔG_c 。后续测量中,给修正环境温度误差后的测量值加上或减去 ΔG_c 即可。最后,通过实验验证了文中提出的误差修正方法的有效性。

3 非制冷红外热成像温度定标实验

实验选用 Tau 640 热像仪,如图 3 所示。调节黑体温度,使其从 29.5°C 开始,以 0.1°C 的间隔逐渐增加,直至 36.5°C 结束。分别记录不同温度黑体辐射量对应的灰度值,以及 Tau 640 的机芯温度。



图 3 热像仪定标实验设备

Fig.3 Experimental facilities of thermal imagery calibration

温度标定过程中,为了减小温度漂移和仪器噪声的影响,每个温度点处,都用 Tau 640 连续采集的 4 帧图像进行帧间滤波,并以 4 帧滤波图像的平均灰度值做为热像仪在该温度下的灰度,实验结果如图 4 所示。由图 4 看出,图像灰度随温度升高呈非线性递增关系。

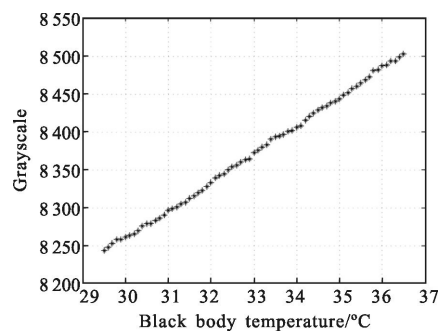


图 4 热像仪标定的灰度-温度曲线

Fig.4 Grayscale-temperature curve of thermal imagery calibration

4 修正环境温度变化引起的误差

将热像仪放入高低温箱，使其镜头通过高低温箱的窗口伸出箱外并用橡塑保温材料填充热像仪和高低温箱窗口间的空隙,为了避免窗口密封不严,导致箱内的辐射影响热像仪成像,用铝箔遮挡窗口,如图 5 所示。通过控制高低温箱的温度使热像仪的机芯温度发生变化。

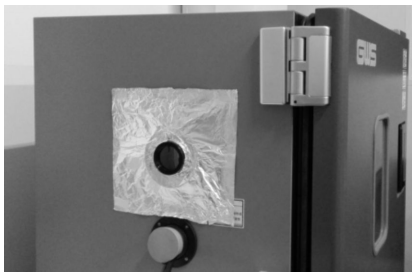


图 5 修正温度误差实验热像仪放置图

Fig.5 Placement of thermal imagery in experiment of environment error correction

为了使黑体充满热像仪的整个视场,放置时,黑体和热像仪伸出窗外的镜头尽量靠近。实验中,使黑体温度从 23℃开始以 1℃的间隔递增到 35℃。黑体温度稳定后,设置高低温箱温度,使机芯温度从 23℃开始递增,机芯温度每变化 0.1℃或 0.2℃记录一次热像仪灰度值,机芯温度到达 30.1℃后结束。实验获得 13 个黑体温度下不同机芯温度时热像仪采集的灰度值如图 6 所示。

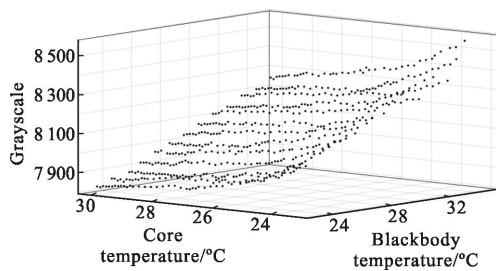


图 6 灰度随机芯温度和环境温度的变化曲线

Fig.6 Change curve of grayscale follow the change of core temperature and environment temperature

图 7~图 10 是对图 6 的原始数据进行最小二乘三阶拟合、最小二乘五阶拟合、幂函数拟合和支持向量机(SVM)方法拟合的结果。表 3 是 4 种方法拟合曲线的均方误差(MSE)。由图 7~图 10,以及表 3 可

以看出:五阶最小二乘法的拟合结果优于三阶最小二乘和幂函数拟合的拟合结果;支持向量机的拟合结果优于五阶最小二乘法,且更接近原始数据。因此文中最终采用支持向量机对实验数据进行拟合。

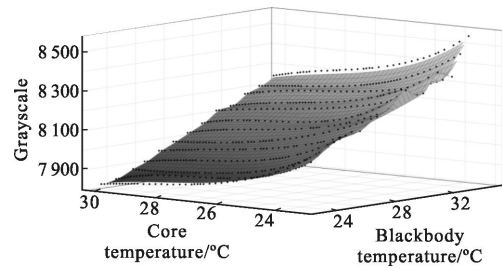


图 7 最小二乘法三阶拟合效果

Fig.7 Result of third order least squares fitting

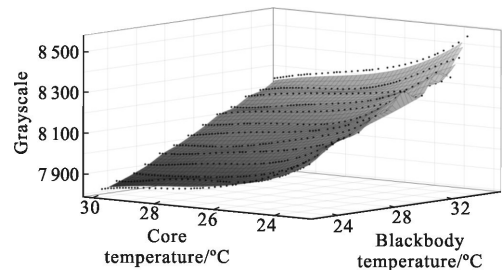


图 8 最小二乘法五阶拟合效果

Fig.8 Result of fifth order least squares fitting

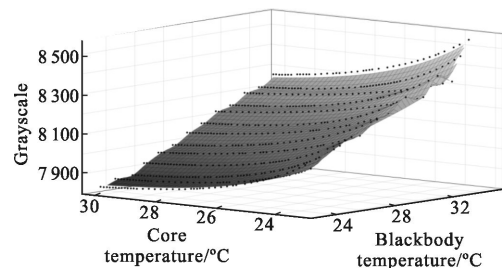


图 9 幂函数拟合效果

Fig.9 Result of power function fitting

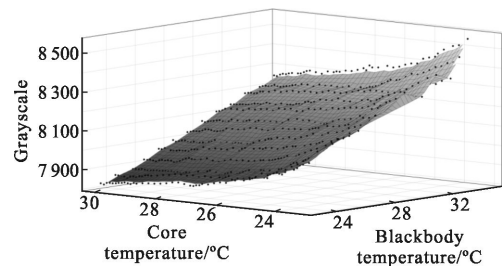


图 10 支持向量机拟合效果

Fig.10 Result of SVM fitting

表 3 4 种方法拟合环境温度-机芯温度-灰度曲面的均方误差

Tab.3 Error of four kinds of fitting methods of environment temperature-grayscale and core temperature-grayscale

Method	Third orderleast squares	Fifth orderleast squares	Power function	SVM
MSE	5.900 9	5.222 6	7.791 8	1.084 9

实验中使用 Camera Controller GUI 上位机软件,读取 Tau640 的机芯温度 T_c ,通过热电偶测得环境温度 T_u ,由图 10 中拟合的数据关系查表求得当前机芯温度 T_c 和环境温度 T_u 下热像仪采集的灰度值 $G_e(T_c)$,由公式(13)的前两项求得修正环境温度误差后的测量灰度值。最后由黑体标定的温度-灰度对应关系,查表得到经温度误差修正后的温度测量值。该测温误差修正方法在一定程度上修正了由环境温度变化引入的测量误差,使修正后的测温值更接近实际温度。

5 修正机芯温度变化引起的误差

由公式(13)可知被测目标和环境温度不变时,机芯温度变化引起响应灰度的变化值为定值。在实际测量时,需要先测得稳定的机芯温度值 T_c ,然后根据 T_c 与热像仪标定时机芯温度 T_r ,查找图 10 中的拟合结果,根据公式(13)在修正环境温度测量值(公式(13)的前两项)的基础上加上($T_r < T_c$)或减去($T_r > T_c$)误差值 ΔG_c 即可。由图 10 查表得到每个黑体温度下,机芯温度变化引起的灰度值变化 ΔG_r 后,求均值就得到了公式(13)中的校正参数 ΔG_c 。由公式(13)最终得到非制冷微测辐射热计热像仪的温度(环境和机芯温度)误差修正值。

6 环境、机芯温度修正及实验结果分析

首先对图 11 中的 7 个区域进行测量及修正。实际测量人体表面温度场分布的实验中(如图 12 灰度图和图 13 伪彩图所示),记录的热像仪温度为 24.3~24.5 °C,导致实际测量结果偏高。因此需要在修正环境误差的基础上减去由机芯温度的降低而引入的测量误差值 ΔG_c ,得到环境、机芯温度误差补偿后的测量结果 T_i 。在此基础上计算温度误差修正后比温度误差修正前精度提高的百分比,结果如表 4 所示。

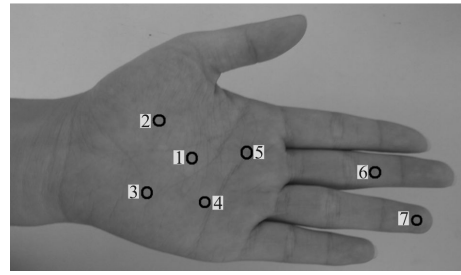


图 11 待测量标记圈的位置

Fig.11 Location of marked circle waiting for testing

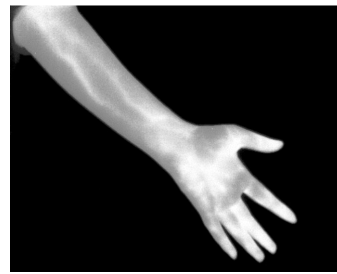


图 12 人体表面温度场的灰度图像显示图

Fig.12 Gray image of skin surface temperature field

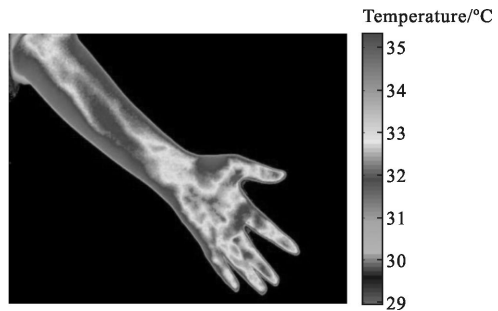


图 13 人体表面温度场的伪彩色显示

Fig.13 Pseudo-color image of skin surface temperature field

表 4 中列出了 7 个区域经温度误差修正后测量精度提高的百分比,平均提高 88.2%。

表 4 手掌温度误差修正实验结果

Tab.4 Result of palm temperature error correction experiment

Measurement object	T	T_0	T_i	E_0	E_i	Percentage of improved accuracy
Area1	32.3	35.7	31.6	3.4	0.7	79.4%
Area2	30.7	34.7	30.3	4	-0.4	90%
Area3	30.8	35.6	31.5	4.8	0.7	85.4%
Area4	30.7	35.5	31.4	4.8	0.7	85.4%
Area5	30.5	34.4	30.2	3.9	-0.3	92.3%
Area6	30	34.3	30.2	4.3	0.2	95.3%
Area7	29.1	33.9	29.6	4.8	0.5	89.5%

其次分别测量手掌、胳膊、脸颊、额头和鼻子某一标记区域的温度值并修正。实验结果如表 5 所示。由表 5 看出:温度误差修正后,热像仪的测温精度得到显著提高。其中 T 为热电偶的测量值, T_0 是未经温度修正的测量值, T_i 是环境和机芯温度误差修正后的测量值。 E_0 和 E_i 为环境和机芯温度修正前、后的测量误差。

表 5 人体部分表面温度误差修正实验结果

Tab.5 Result of temperature error correction experiment

Measurement object	T	T_0	T_i	E_0	E_i	Percentage of improved accuracy
Hand	31.9	35.9	32.5	4	0.6	85%
Arm	33	35.4	31.9	2.4	-1.1	54.2%
Forehead	33.4	36.4	32.6	3	-0.8	73.3%
Cheek	31.2	34.3	30.6	3.1	-0.6	80.6%
Nose	30.4	33.8	29.5	3.4	-0.9	73.5%

7 结 论

文中针对非制冷红外热像仪的使用温度与标定温度不同,造成测温精度不高的问题,提出一种对使用环境温度和热像仪机芯温度误差进行修正的方法:首先由环境温度修正实验,通过支持向量机对实验样本数据的拟合得到环境温度影响微测辐射热计热像仪测量精度的误差修正模型,用于修正热像仪黑体标定时和环境温度和实际测量时环境温度的不同产生的测量误差;其次,设计了机芯温度误差修正实验,用以修正由热像仪标定时和实际测量时机芯温度的不同产生的测量误差。通过对比环境和机芯温度修正前、后,热像仪和热电偶的测温结果,验证了误差修正后的测量精度至少可提高 50%,使人体表面温度测量值更加接近真实温度。

参考文献:

[1] Li Guohua, Wu Lixin, Wu Miao, et al. Infrared thermal

image technique and it's application progress research [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2004, 33(3): 227-230. (in Chinese)

李国华, 吴立新, 吴淼, 等. 红外热像技术及其应用的研究进展[J]. 红外与激光工程, 2004, 33(3): 227-230.

[2] Lahiri B B, Bagavathiappan S, Jayakumar T, et al. Medical applications of infrared thermography: a review [J]. *Infrared Physics & Technology*, 2012, 55(4): 221-235.

[3] Chiu W, Lin P, Chiou H Y, et al. Infrared thermography to mass-screen suspected SARS patients with fever [J]. *Asia-Pacific Journal of Public Health*, 2005, 17(1): 26-28.

[4] Bai Tingzhu, Jin Weiqi. Photoelectric Imaging Principle and Technology [M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Publishing House, 2013. (in Chinese)

白廷柱, 金伟其. 光电成像原理与技术[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2013.

[5] Ding Weiyi. Key technology and algorithm research of uncooled infrared thermal imaging temperature measuring system [D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2014. (in Chinese)

丁维一. 非制冷红外热成像测温系统关键技术和算法研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2014.

[6] Shi Dongping, Wu Chao, Li Zijun, et al. The impact analysis of infrared measuring temperature based on the reflection of temperature compensation and temperature compensation [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(8): 2321-2326. (in Chinese)

石东平, 吴超, 李孜军, 等. 基于反射温度补偿及入射温度补偿的红外测温影响分析 [J]. 红外与激光工程, 2015, 44(8): 2321-2326.

[7] Jones B F. A reappraisal of the use of infrared thermal image analysis in medicine [J]. *IEEE Transactions on Medical Imaging*, 1998, 17(6): 1019-1027.

[8] Yang Li, Yang Zhen. Infrared Thermal Imaging Temperature Measuring Principle and Technology [M]. Beijing: Science Publishing House, 2012. (in Chinese)

杨立, 杨帧. 红外热成像测温原理与技术[M]. 北京: 科学出版社, 2012.