

可见光波段高温标定的简化方法

李云龙 李周 孙志远 杨国庆

A simplified method for high temperature calibration in the visible light band

LI Yun-long, LI Zhou, SUN Zhi-yuan, YANG Guo-qing

引用本文:

李云龙, 李周, 孙志远, 杨国庆. 可见光波段高温标定的简化方法[J]. *中国光学*, 2024, 17(3): 580–585. doi: 10.37188/CO.2023-0122

LI Yun-long, LI Zhou, SUN Zhi-yuan, YANG Guo-qing. A simplified method for high temperature calibration in the visible light band[J]. *Chinese Optics*, 2024, 17(3): 580-585. doi: 10.37188/CO.2023-0122

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.37188/CO.2023-0122>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

大视场空间可见光相机的杂散光分析与抑制

Analysis and suppression of space stray light of visible cameras with wide field of view
中国光学 (中英文). 2019, 12(3): 678 <https://doi.org/10.3788/CO.20191203.0678>

双波段芯片集成封装组件的低温光谱定量化

Low temperature spectroscopy quantification of integrated dual band chip package
中国光学 (中英文). 2017, 10(6): 744 <https://doi.org/10.3788/CO.20171006.0744>

高温下数字图像相关散斑最优成像探究

Optimal imaging of digital image correlation speckle under high temperature
中国光学 (中英文). 2018, 11(5): 728 <https://doi.org/10.3788/CO.20181105.0728>

星载激光测高仪距离参数地面标定方法

Ground calibration method for distance parameters of satellite-borne laser altimeter
中国光学 (中英文). 2019, 12(4): 896 <https://doi.org/10.3788/CO.20191204.0896>

基于中阶梯光栅的波长定标方法研究

Spectral calibration based on echelle
中国光学 (中英文). 2017, 10(3): 376 <https://doi.org/10.3788/CO.20171003.0376>

光学卫星在轨动态场景实时匹配方法及试验

On-orbit dynamic scene real-time matching method and experiment of optical satellite
中国光学 (中英文). 2019, 12(3): 575 <https://doi.org/10.3788/CO.20191203.0575>

文章编号 2097-1842(2024)03-0580-06

可见光波段高温标定的简化方法

李云龙*, 李 周, 孙志远, 杨国庆

(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033)

摘要: 为了提高可见光波段 ($0.3\ \mu\text{m}$ ~ $0.9\ \mu\text{m}$) 高温标定的效率, 提出了可见光波段高温标定的简化方法。本文提出了带有曝光时间变量的可见光波段的高温标定模型, 通过大量实验发现, RGB 相机各个通道的灰度值不仅随曝光时间递增呈线性变化, 且随黑体辐射亮度的递增也呈线性变化, 进而确定了可见光波段高温标定模型的具体形式。为了求解简化后的可见光波段高温标定模型中的未知数, 在两个黑体辐射亮度下, 分别采集两个曝光时间下的图像数据, 接着, 对图像数据进行处理, 便可以得到任意曝光时间下的 RGB 相机高温标定曲线。最后, 对本文提出的简化可见光波段高温标定方法与常规按曝光时间进行可见光波段高温标定法进行比较。实验结果表明: R、G、B 通道计算值与标定值的相对误差最大值分别为 3.38%、2.56% 和 -1.14%, 且各通道的计算值与标定值的相对误差均未超过 3.50%。本文提出的数学模型可以有效地简化传统的高温标定法, 进而大大缩短了高温标定时间, 提高了高温标定的标定效率。

关键词: 可见光波段; 高温标定; RGB 相机; 曝光时间

中图分类号: TK311

文献标志码: A

doi: 10.37188/CO.2023-0122

A simplified method for high temperature calibration in the visible light band

LI Yun-long*, LI Zhou, SUN Zhi-yuan, YANG Guo-qing

(Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics,
Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

* Corresponding author, E-mail: 1710453334@qq.com

Abstract: To improve the efficiency of high temperature calibration in the visible light band ($0.3\ \mu\text{m}$ ~ $0.9\ \mu\text{m}$), a simplified method for high-temperature calibration is proposed. Firstly, a high-temperature calibration model in the visible light band with exposure time variable is proposed. Based on a large number of experimental data, it is found that the gray value of each channel of an RGB camera varies linearly not only with the increase of exposure time, but also with the increase of black-body radiation brightness. Thus, a specific form of high-temperature calibration model in the visible light band is determined. To solve the unknowns in the simplified high-temperature calibration model in the visible light band, image data at two different exposure times are collected under two levels of black-body radiation brightness, and then the image data is processed to obtain the high-temperature calibration curve of the RGB camera under any exposure

收稿日期: 2023-07-21; 修订日期: 2023-08-22

基金项目: 国家自然科学基金 (No. 6210031610)

Supported by National Natural Science Foundation of China (No. 6210031610)

time. Finally, the simplified visible light band high-temperature calibration method proposed in this article is compared to the conventional visible light band high-temperature calibration method based on exposure time. The experimental results show that the maximum relative error between the calculated value of the R channel, G channel, B channel and the calibrated values are 3.38%, 2.56%, -1.14%. Moreover, the relative error between the calculated and the calibrated values for each channel does not exceed 3.50%. The mathematical model proposed in this article can effectively simplify the conventional high-temperature calibration method, resulting in a reduced high-temperature calibration time and improving the calibration efficiency.

Key words: visible light band; high temperature calibration; RGB camera; exposure time

1 引言

随着国内军事测控技术的发展,对火箭尾焰、导弹尾焰以及爆炸火焰等的真温及温度场测量需求进一步增大^[1-3]。由于上述测温场景的响应时间短,所以传统的接触式测温技术无法使用,为了更精确地测量高温目标的真温与温度场,需要对可见光辐射测温系统进行精准标定^[4-6]。

目前,国内外针对可见光相机进行高温标定时,为了提高基于 CCD (Charge-Coupled Device, CCD) 相机的高温测量系统的温度测量范围,提出了采用 RGB 滤光片的温度标定方法^[7],进一步提高了温度的标定精度与测量范围。为克服 CCD 相机单幅图像量程太窄的问题,根据比色测温的原理且使用超高速 CCD 相机,提出了针对不同快门速度下的温度数学模型^[8],解决了 CCD 相机单幅图像量程受限的问题。在对高温目标测量时,为了提高信噪比与动态响应范围,需要根据被测目标的温度选择合适的曝光时间。但目前的高温标定方法在进行标定时,需要在标定温度范围内将各曝光时间分别与各温度点进行组合,这项工作需要大量的时间成本。

本文为了简化高温标定过程,使用 CI 高温黑体对可见光波段的 RGB 相机进行高温标定,并建立了带有曝光时间变量的高温标定模型,通过相关实验验证了此模型的合理性。根据此模型提出了简化的 RGB 相机高温标定方法,即在任意两曝光时间下,分别采集两个温度点的黑体图像,对采集的 4 幅黑体图像进行处理便可以得到任意曝光时间下的黑体高温标定曲线。最后通过实验将本文提出的简化 RGB 相机高温标定模型与常规的曝光时间高温标定法进行对比。

2 RGB 相机的高温标定原理、高温标定模型及其工作原理

2.1 RGB 相机各通道的高温标定原理

由普朗克黑体辐射定律可知,在温度为 T 、波长为 λ 处黑体的光谱辐射出射度 $M(\lambda, T)$ 为^[9-10]:

$$M(\lambda, T) = \frac{C_1 \lambda^{-5}}{e^{\frac{C_2}{\lambda T}} - 1}, \quad (1)$$

式中: $C_1 = 2\pi hc^2 = 3.7415 \times 10^8 (\text{W} \cdot \mu\text{m}^4/\text{m}^2)$ 为第一辐射常数, $C_2 = hc/k = 1.43879 \times 10^4 (\mu\text{m} \cdot \text{K})$ 为第二辐射常数。又由光谱发射率 $\varepsilon(\lambda, T)$ 的定义可知:

$$\varepsilon(\lambda, T) = \frac{M_0(\lambda, T)}{M(\lambda, T)}, \quad (2)$$

式中, $M_0(\lambda, T)$ 为被测目标在温度为 T 时波长 λ 处的光谱辐射出射度。

根据式(1)与式(2)可推导出被测目标的全波长辐射亮度 $L(T)$ ^[11-12]:

$$L(T) = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\varepsilon(\lambda, T) C_1}{\lambda^5 e^{\frac{C_2}{\lambda T}}} d\lambda. \quad (3)$$

根据 RGB 相机的成像原理以及普朗克黑体辐射定律,可得到 RGB 相机三个通道接收到的辐射亮度与黑体的辐射出射度关系,如式(4)所示:

$$\begin{cases} L_r = \int_{380}^{900} H_r(\lambda) M(\lambda, T) d\lambda \\ L_g = \int_{380}^{900} H_g(\lambda) M(\lambda, T) d\lambda \\ L_b = \int_{380}^{900} H_b(\lambda) M(\lambda, T) d\lambda \end{cases}, \quad (4)$$

式中, L_r 、 L_g 、 L_b 分别为 RGB 相机在 3 个通道上接收到的辐射亮度, $H_r(\lambda)$ 、 $H_g(\lambda)$ 、 $H_b(\lambda)$ 分别为 RGB

相机在 3 个通道上的光谱响应函数。

在 RGB 相机的线性响应范围内, 可以建立 RGB 相机 3 个通道的输出灰度值与黑体辐射亮度的数学模型, 其表达式如式(5)所示:

$$\begin{cases} G_r = f(t, L_r) + G_r^{\text{noise}} \\ G_g = f(t, L_g) + G_g^{\text{noise}} \\ G_b = f(t, L_b) + G_b^{\text{noise}} \end{cases}, \quad (5)$$

式中, G_r 、 G_g 、 G_b 为 RGB 相机靶面上各通道灰度有效值的均值; t 为 RGB 相机的曝光时间; $f()$ 为待求解的函数关系; G_r^{noise} 、 G_g^{noise} 、 G_b^{noise} 分别为 RGB 相机上各个通道的像元自身固有噪声产生的灰度输出值。

由维恩位移定律可知, 在可见光波段 (380 nm~900 nm), RGB 相机对应的响应温度均在 900 K 以上, 所以在对 RGB 相机进行高温标定时, 环境温度对其的影响可以忽略。因此, 只需考虑大气衰减与路径辐射对 RGB 相机标定的影响, 在保证成像清晰的前提下, 尽可能地将 RGB 相机镜头靠近黑体辐射面。

传统的 RGB 相机按曝光时间的高温标定步骤如下:

- (1) 将高温黑体放置在 RGB 相机前, 并调整 RGB 相机焦距, 使黑体辐射面成像清晰;
- (2) 在 RGB 相机的某一曝光时间下, 逐一设置高温黑体温度, 待温度稳定后, 采集标定图像;
- (3) 改变 RGB 相机的曝光时间, 重复步骤

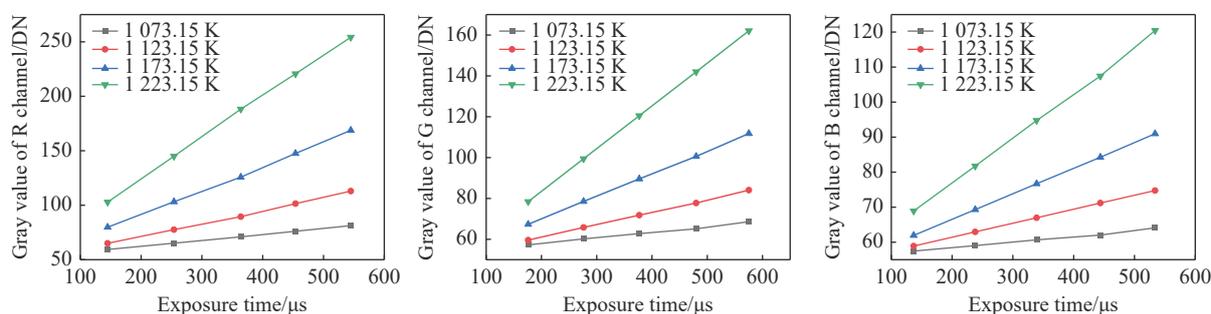


图 2 相机各通道灰度均值随曝光时间的变化曲线

Fig. 2 The mean gray values for each channel of camera varying with the exposure time

从图 2 可以看出, 在黑体温度一定时, RGB 相机的各个通道的灰度值与曝光时间成线性关系, 而且随着黑体温度的升高, 各通道的响应曲线斜率增大。

(2), 将所有曝光时间标定完毕。

经上述描述, 传统的 RGB 相机按曝光时间的高温标定, 其时间成本较高, 因此, 本文将进一步通过实验找出 RGB 相机的响应灰度值、曝光时间与黑体辐射亮度之间的函数关系。

2.2 RGB 相机各通道灰度值与曝光时间的关系

标定实验使用的黑体为 CI 高温腔型黑体, 其辐射尺寸为 1 英寸, 可设温度范围为 423.15 K~1 573.15 K, 温度精度为 0.01 °C, 发射率为 0.99。可见光相机使用的是千眼狼的 RGB 相机, 测量波段为 380 nm~900 nm, 探测器像元大小为 10 μm×10 μm, 靶面大小为 1 920×1 080, 输出位数为 8 位。实验装置如图 1 所示。



图 1 RGB 相机高温标定实验装置

Fig. 1 Experimental setup of high temperature calibration for RGB camera

黑体温度分别设置为 1 073.15 K、1 123.15 K、1 173.15 K、1 223.15 K, 并且设置合理的相机曝光时间。在黑体温度一定时, RGB 相机各个通道的灰度均值随曝光时间的变化曲线如图 2 所示。

2.3 RGB 相机各通道灰度值与黑体辐射亮度间的关系

在曝光时间一定的条件下, 设定黑体温度从 973.15 K~1 423.15 K 间隔 50 K 变化。为了使实

验结果具有普适性, R 通道分别采集曝光时间为 145 μs 、364 μs 、545 μs 的图像, G 通道分别采集曝光时间为 276 μs 、480 μs 、575 μs 的图像, B 通

道分别采集 137 μs 、444 μs 、534 μs 的图像。图 3 为曝光时间一定的条件下, RGB 相机 3 个通道的灰度均值随黑体辐射亮度的变化曲线。

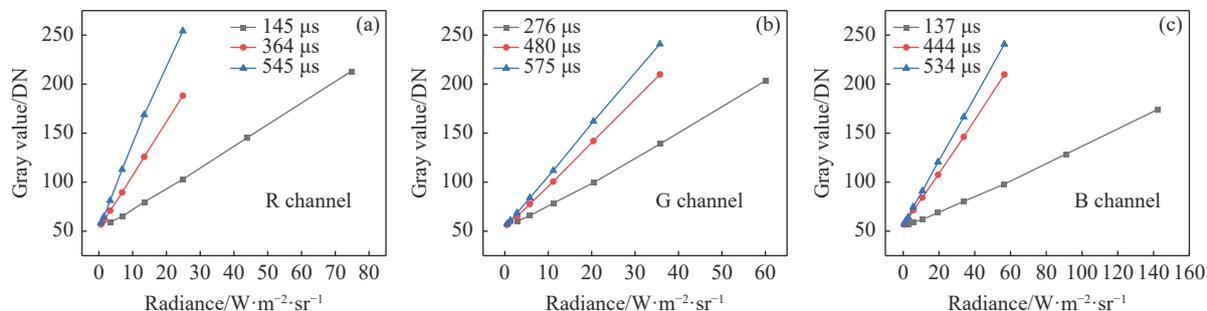


图 3 相机各通道灰度均值随黑体辐射亮度的变化曲线。(a) R 通道; (b) G 通道; (c) B 通道

Fig. 3 The mean gray values for each channel of the camera as a function of the brightness of the blackbody radiation. (a) R channel; (b) G channel; (c) B channel

从图 3 可以看出, 在曝光时间一定的条件下, RGB 相机各个通道的灰度均值与黑体辐射亮度成线性关系, 且随着曝光时间的增加, 曲线的斜率也增大。计算图 3 中各曝光时间下曲线的斜率与

截距, 得到 RGB 相机各曝光时间下相应各通道的斜率与截距值, 如表 1 所示(其中 DN(Digital Number)为灰度值单位, 下文简称 DN)。

表 1 在曝光时间一定的条件下 RGB 相机各通道的斜率与截距值

Tab. 1 The slope and intercept values of each channel of an RGB camera under certain exposure time

R通道曝光时间/ μs	R通道斜率/(DN·W ⁻¹ ·m ² ·sr)	R通道截距/DN	G通道曝光时间/ μs	G通道斜率/(DN·W ⁻¹ ·m ² ·sr)	G通道截距/DN	B通道曝光时间/ μs	B通道斜率/(DN·W ⁻¹ ·m ² ·sr)	B通道截距/DN
145	2.17	50.58	276	2.52	50.74	137	0.84	53.08
364	5.44	52.79	480	4.37	53.10	444	2.72	55.12
545	8.14	54.70	575	5.24	54.06	534	3.27	55.90

由表 1 数据可以发现, 响应曲线的斜率和截距都与曝光时间成近似线性关系, 且不难发现, 在曝光时间一定的条件下, 各通道响应曲线的斜率比值与曝光时间的比值近似相等, 经计算 R 通道的相对误差小于 0.2%、G 通道的相对误差小于 0.3%、B 通道的相对误差小于 0.13%。

2.4 含曝光时间的 RGB 相机高温标定模型的确定

根据上述结论, 公式(5)中的未知函数中的 $f()$ 可以展开为线性公式:

$$\begin{cases} G_r = t(K_r L_r(T) + B_r) + G_r^{\text{noise}} \\ G_g = t(K_g L_g(T) + B_g) + G_g^{\text{noise}} \\ G_b = t(K_b L_b(T) + B_b) + G_b^{\text{noise}} \end{cases}, \quad (6)$$

式中: K_r 、 K_g 、 K_b 分别为 R、G、B 三通道随曝光时间变化的辐射响应率 ($\text{W}^{-1} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{sr} \cdot \mu\text{s}^{-1}$), B_r 、 B_g 、

B_b 分别为 R、G、B 三通道受曝光时间影响的偏置 ($\text{W}^{-1} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{sr} \cdot \mu\text{s}^{-1}$)。

3 简化的高温标定方法

根据公式(6), 便可以计算出 RGB 相机各通道下的 K_r 、 K_g 、 K_b 、 B_r 、 B_g 、 B_b 、 G_r^{noise} 、 G_g^{noise} 、 G_b^{noise} , 随后便可以得到 RGB 相机任何曝光时间下的高温标定数据。获取上述参数只需要在两黑体温度下采集两个曝光时间的图片数据。

简化后的标定步骤如下:

(1) 设定黑体温度为 T_1 , RGB 相机分别采集曝光时间 t_1 、 t_2 下的黑体图像。

(2) 改变黑体温度为 T_2 , RGB 相机分别采集曝光时间 t_1 、 t_2 下的黑体图像。

(3) 将上述流程中黑体温度分别为 T_1 和 T_2 时, 对应的 RGB 相机曝光时间 t_1 与 t_2 的 4 幅图像进行处理, 便可以得到 K_r 、 K_g 、 K_b 、 B_r 、 B_g 、 B_b 、 G_r^{noise} 、 G_g^{noise} 、 G_b^{noise} 。

4 简化的高温标定法与传统曝光时间标定法的对比实验

首先, 使用传统的曝光时间标定方法进行实验, 设定黑体温度在 973.15 K~1 323.15 K, 间隔 50 K 为一个标定点, 分别对 RGB 相机各个通道的曝光时间 200 μs 、300 μs 、400 μs 、500 μs 进行

标定; 然后使用简化后的曝光时间标定方法, 设置黑体温度为 1 123 K、1 173 K, RGB 相机的曝光时间设置为 200 μs 、300 μs , 采集 4 幅图像进行标定。根据公式(6)计算高温标定的 9 个未知参数 K_r 、 K_g 、 K_b 、 B_r 、 B_g 、 B_b 、 G_r^{noise} 、 G_g^{noise} 、 G_b^{noise} , 其计算结果如表 2 所示。

根据表 2 的数据, 可以得到简化后的曝光时间标定模型为:

$$\begin{cases} G_r = t(0.0149L_r(T) + 0.0103) + 49.07 \\ G_g = t(0.009L_g(T) + 0.0112) + 47.67 \\ G_b = t(0.006L_b(T) + 0.0070) + 52.10 \end{cases}, \quad (7)$$

表 2 简化标定的 9 个未知数

Tab. 2 9 unknowns for simplified calibration

K_r ($\text{W}^{-1}\cdot\text{m}^2\cdot\text{sr}\cdot\mu\text{s}^{-1}$)	B_r ($\text{W}^{-1}\cdot\text{m}^2\cdot\text{sr}\cdot\mu\text{s}^{-1}$)	G_r^{noise} (DN)	K_g ($\text{W}^{-1}\cdot\text{m}^2\cdot\text{sr}\cdot\mu\text{s}^{-1}$)	B_g ($\text{W}^{-1}\cdot\text{m}^2\cdot\text{sr}\cdot\mu\text{s}^{-1}$)	G_g^{noise} (DN)	K_b ($\text{W}^{-1}\cdot\text{m}^2\cdot\text{sr}\cdot\mu\text{s}^{-1}$)	B_b ($\text{W}^{-1}\cdot\text{m}^2\cdot\text{sr}\cdot\mu\text{s}^{-1}$)	G_b^{noise} (DN)
0.0149	0.0103	49.07	0.0091	0.0112	47.67	0.0061	0.0070	52.10

将不同的曝光时间带入式(7)中便可以得到任意曝光时间下的各通道的高温标定结果。将曝光时间 400 μs 、500 μs 带入式(7)中, 通过理论模型计算 RGB 相机在以上两个曝光时间下各个通道的高温标定数据并将其记为计算值, 并将传统曝光时间标定得到的灰度均值记为标定值, 比较计算值与标定值之间的相对误差, 如表 3 所示。

表 3 计算值与标定值的相对误差

Tab. 3 Error between calculated and calibrated values

温度(K)	400 μs			500 μs		
	R(%)	G(%)	B(%)	R(%)	G(%)	B(%)
973.15	-1.11	0.43	-0.22	2.17	-0.57	0.73
1023.15	0.32	0.91	-0.57	3.38	-0.15	-0.40
1073.15	-0.06	2.56	1.01	0.63	0.38	1.10
1123.15	0.78	2.48	-1.14	-1.98	0.28	-0.89
1173.15	-0.05	2.49	0.03	-2.82	0.53	-0.20
1223.15	-0.18	1.09	0.62	1.15	-0.75	-0.83
1273.15	--	0.23	0.72	--	-0.00	-0.04
1323.15	--	--	-0.45	--	--	-0.03

表 3 中的“--”表示黑体温度过高导致 RGB 相机的像元饱和。从表 3 可以看出: RGB 相机

的各个通道在不同曝光时间下, R 通道计算值与标定值的相对误差最大值为 3.38%、G 通道计算值与标定值的相对误差最大值为 2.56%、B 通道计算值与标定值的相对误差最大值为 -1.14%, 且各通道的计算值与标定值的相对误差均未超过 3.50%。

5 结 论

本文提出了带有曝光时间的 RGB 相机各通道高温标定的数学模型。在任意两个曝光时间下采集两个温度点的黑体辐射图像, 并对黑体图像进行处理获取简化后的高温标定模型中的未知参数, 便可以得到任意曝光时间下的高温标定曲线。随后对本文提出的高温标定模型法与常规按照曝光时间的高温标定法进行对比实验。实验结果显示, 使用该高温标定模型与常规曝光时间标定时, R 通道、G 通道、B 通道计算值与标定值的相对误差最大值分别为 3.38%、2.56% 及 -1.14%, 且各通道的计算值与标定值的相对误差均未超过 3.50%。结果表明利用该数学模型可以有效地简化常规的曝光时间高温标定法, 大大缩短了高温标定时间, 提高了高温标定效率, 对今后的高温可见光波段的高温标定研究具有重要意义。

参考文献:

- [1] XIE CH Y, SONG J, LIU Y, *et al.*. Design and research on calibration method of multi-channel self-calibration infrared radiation thermometer[J]. *Proceedings of SPIE*, 2021, 12061: 120611M.
- [2] HU H, SONG P, FENG H, *et al.*. Surface temperature of blast fireball measured by colorimetric thermometer[C]. *Proceedings of the International Conference on Mechatronic System and Measurement Technology*, 2012.
- [3] 李进军. 彩色 CCD 比色测温的灰度值融合处理方法研究[J]. *计算机测量与控制*, 2012, 20(1): 177-179.
LI J J. An intensity fusion method applied to color CCD-based colorimetric temperature measurement[J]. *Computer Measurement & Control*, 2012, 20(1): 177-179. (in Chinese).
- [4] YAN J H, LI W T. Error correction research of colorimetric temperature-measurement based on CCD[C]. *Proceedings of the 31st Chinese Control Conference*, IEEE, 2012: 5649-5652.
- [5] YAN R, ZHOU X M, LI F. Survey of dual waveband colorimetric temperature measurement technology[C]. *Proceedings of the 26th Chinese Control and Decision Conference*, IEEE, 2014: 5177-5181.
- [6] 张晓龙, 刘英, 孙强. 高精度非制冷长波红外热像仪的辐射标定[J]. *中国光学*, 2012, 5(3): 235-241.
ZHANG X L, LIU Y, SUN Q. Radiometric calibration of uncooled long-wave infrared thermal imager with high-precision[J]. *Chinese Optics*, 2012, 5(3): 235-241. (in Chinese).
- [7] 黄洁, 张轲, 朱晓鹏, 等. 基于 RGB 数字滤光的 CCD 激光熔覆测温系统的标定[J]. *光电子·激光*, 2013, 24(5): 967-974.
HUANG J, ZHANG K, ZHU X P, *et al.*. Calibration of CCD temperature measurement system based on RGB digital filtering in laser cladding[J]. *Journal of Optoelectronics-Laser*, 2013, 24(5): 967-974. (in Chinese).
- [8] 毛尹航, 于天河. 高速 CCD 像机的测温系统标定方法[J]. *哈尔滨理工大学学报*, 2016, 21(1): 72-76.
MAO Y H, YU T H. Calibration method to measure the temperature system based on the high-speed CCD camera[J]. *Journal of Harbin University of Science and Technology*, 2016, 21(1): 72-76. (in Chinese).
- [9] 马岩, 张帅, 刘元, 等. 基于天基定量实测数据的月球长波红外辐射特性研究[J]. *中国光学*, 2022, 15(3): 525-533.
MA Y, ZHANG SH, LIU Y, *et al.*. Lunar long-wave infrared radiation characteristics based on space-based quantitative measured data[J]. *Chinese Optics*, 2022, 15(3): 525-533. (in Chinese).
- [10] 孙志远, 常松涛, 朱玮. 中波红外探测器辐射定标的简化方法[J]. *红外与激光工程*, 2014, 43(7): 2132-2137.
SUN ZH Y, CHANG S T, ZHU W. Simplifying method of radiance calibration for MWIR detector[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(7): 2132-2137. (in Chinese).
- [11] 罗茂捷, 周金梅, 傅景能, 等. 考虑积分时间变量的红外系统辐射响应定标[J]. *红外与激光工程*, 2013, 42(1): 36-40.
LUO M J, ZHOU J M, FU J N, *et al.*. Integration time as variable for radiometric calibration of infrared system[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(1): 36-40. (in Chinese).
- [12] 梁美, 孙博君, 孙晓刚, 等. 多光谱高温计有效波长标定方法研究[J]. *光谱学与光谱分析*, 2017, 37(8): 2352-2355.
LIANG M, SUN B J, SUN X G, *et al.*. Study on effective wavelength calibration method of multispectral pyrometer[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2017, 37(8): 2352-2355. (in Chinese).

作者简介:



李云龙(1998—), 男, 吉林德惠人, 硕士, 研究实习员, 2022年于哈尔滨工业大学获得硕士学位, 主要从事多光谱辐射测温、红外辐射特性等方面的研究。E-mail: 1710453334@qq.com