

双光谱扫描成像系统设计

代少升¹, 刘润泽^{1*}, 杨登泰²

(1. 重庆邮电大学 通信与信息工程学院, 重庆 400065; 2. 中国人民解放军 93119 部队, 酒泉 735000)

摘要: 针对传统双光谱成像系统存在图像配准困难、视场角度小、成本高等问题, 文章提出一种基于单元扫描的双光谱成像系统。该系统通过分光镜实现红外线和可见光分离, 而红外线由红外聚焦镜头汇聚到红外单元传感器, 可见光由普通光学镜头汇聚到可见光传感器, 通过等时间扫描采样方法实现双光谱成像。为了提高测温精度, 系统针对成像距离和角度进行补偿, 并采用双线性插值的图像映射方法使采集红外图像和可见光图像分辨率一致。实验结果表明, 基于单元扫描的双光谱成像系统具有视场宽, 无需配准便可将红外图像映射到可见光图像, 且成本低廉。

关键词: 双光谱; 扫描成像; 温度补偿; 图像映射

中图分类号: TP391.41 **文章编号:** 1001-5868(2026)04-0716-08

Design of a Dual-Spectral Scanning Imaging System

DAI Shaosheng, LIU Runze, YANG Dengtai

(1. School of Communication and Information Engineering, Chongqing University of Posts and Telecommunications, Chongqing 400065, CHN; 2. The PLA Unit 93119, Jiuquan 735000, CHN)

Abstract: As a solution to the problems of image registration difficulty, small field of view angle, and high costs associated with traditional dual-spectrum imaging systems, a dual-spectrum imaging system based on unit scanning was developed in this study. This system separated infrared and visible light by passing it through a beam splitter, in which the infrared light was converged by an infrared focusing lens to an infrared unit sensor, and the visible light was converged by an ordinary optical lens to a visible light sensor. Dual-spectrum imaging was achieved using the equal-time scanning sampling method. To improve temperature measurement accuracy, the system compensated for the variations in imaging distance and angle and used the bilinear interpolation image mapping method to make the resolutions of the collected infrared and visible light images consistent. The experimental results showed that the dual-spectrum imaging system based on unit scanning has a wide field of view, can map infrared images to visible light images without image registration, and has a low cost.

Key words: dual spectrum; scanning imaging; temperature compensation; image mapping

0 引言

随着传感器技术的发展, 其种类与应用边界不断拓展。除常见的可见光传感器外, 能接收红外、紫外以及 X 射线等电磁波的图像传感器(如遥感领域^[1-2]、医学图像领域^[3]等)也已在诸多领域实现应

用。受传感器自身材料等限制, 传统单一的传感器难以从参考平面中获得光谱信息。因此, 为了获得对单幅场景的全面描述, 双光谱图像采集是当前的重要研究方向^[4-6]。

图像传感器成像一般分为阵列扫描成像和单元扫描成像: 阵列扫描成像利用线阵列或焦平面阵

收稿日期: 2026-04-08.

* 通信作者: 刘润泽

列成像,成像速度快、系统集成度高,但大阵列传感器价格相对昂贵,尤其是在特殊波段下,其视场角往往受成像镜头限制^[7];单元扫描成像则是利用机械结构进行单元由点到线再到面的扫描方式进行成像,具有视场大、分辨率高、单元探测器价格便宜且易获取等特点^[8]。

本系统通过设计光学扫描结构,仅使用单元的红外和可见光传感器即可完成目标空间中可见光和红外信息的采集,生成具有宽视场的双光谱图像。针对传统双光谱图像配准难度大、分辨率不匹配的问题,本系统通过图像映射的方法实现红外和可见光图像分辨率一致,利用预先标定的空间变换关系将其几何对齐至可见光图像坐标系,无需进行额外的特征点配准。目前市面上大多数双光谱成像系统中红外和可见光均采用阵列式传感器^[9],而本系统通过使用扫描结构,以单元型红外和可见光传感器替换传统的阵列式红外和可见光传感器,既降低了成像成本,又能够实现大视场一致性的扫描成像。通过红外图像与可见光图像融合,可进一步凸显成像视场中的高温热源,对于工业生产场景的早期预防火灾隐患、保持设备安全可靠运行具有重要价值。

1 系统组成与原理

1.1 系统组成

本系统主要由扫描系统与PC端上位机两部分构成:扫描系统以嵌入式系统为核心,负责采集红外与可见光图像并进行红外温度补偿,处理后的数据通过网口传输至上位机;上位机则对图像进行空间映射算法处理,并实现双光谱图像的显示。扫描系统的一维扫描结构如图1所示,主要由红外传感器、可见光传感器、红外镜头、可见光镜头、一维驱动电机、霍尔接近开关、反光镜、分光比为50:50的分光镜组成。在整体光路结构中,光线首先经倾斜45°的反光镜反射,转向90°进入扫描筒内部;随后光线通过一个同样倾斜45°的分光镜,按50:50的比例分成两束,分别经可见光镜头和红外镜头聚焦至可见光传感器与红外传感器。一维驱动电机以恒定角速度驱动上方反光镜转动,将“点”采集转换为“线”采集,实现一维扫描。旋转过程中,接近开关用于检测旋转周期,以实现数据传输的同步。

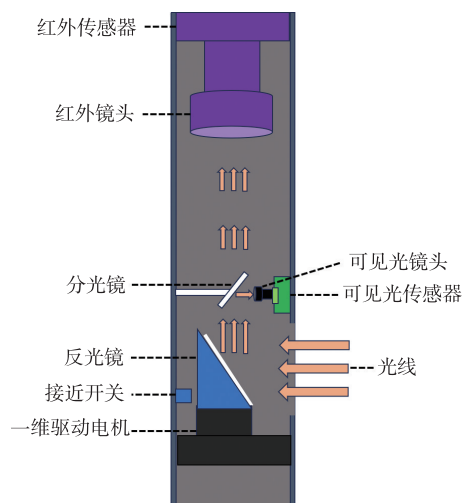


图1 扫描系统一维扫描结构

如图2为扫描系统整体结构的俯视图,主要由一维扫描结构以及二维驱动电机组成。将一维扫描结构与二维驱动电机连接后横向放置在支撑台上,通过二维电机的旋转就可实现由“线”到“面”的采集,设置电机转向时间可以控制扫描系统扫描的视场角度。

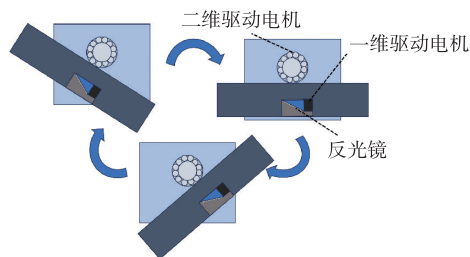


图2 扫描系统二维扫描结构

1.2 系统原理

系统原理图如图3所示。首先,将扫描系统放置在适宜采集目标信息的位置,确保采集装置中心垂直线对准目标物体中心,且系统与目标物体尽量保持平行。系统上电后与上位机建立通信链路,进行视场角度标定:一维和二维电机开始旋转,通过观察扫描系统与被测目标的相对位置,在上位机中设置对应的视场角度参数,完成系统与目标之间的视场同步。设置完成后,扫描系统在设定视场内往复扫描,采集红外与可见光双光谱图像信息。每采集完一行的双光谱图像,系统便通过网口将数据传输至上位机,进行温度补偿与图像映射处理,随后在上位机界面中显示。由此,上位机界面呈现出逐行拼接而成的双光谱图像。当扫描系统达到所设定的视场角度时,即完成一帧图像的采集,随后系统反向扫描,开始下一帧图像的采集。

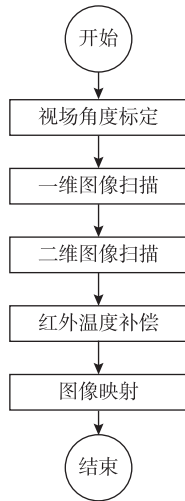


图3 扫描系统二维扫描结构

2 等时间扫描采样

实验采用等时间扫描采集方式,其原理是在一维驱动电机和二维驱动电机维持旋转速度一定的条件下实现等时间间隔的采样^[10]。具体操作为通过系统内部设置定时器为每隔一定时间进入中断,在中断中进行数据采集,因此相邻采样点之间电机的旋转角度是相同的。

2.1 一维扫描采样

一维扫描采样通过一维电机的旋转带动反光镜转动从而使红外和可见光反射到传感器的感光表面进行采样。一维扫描采样如图4所示, H 为一维扫描结构距离扫描线的垂距, O 为一维扫描结构在扫描线上的垂心,扫描线长度为 L ,视场角度为 γ 。扫描结构在扫描线上采样时扫描电机采用等角速度 ω ,扫描结构一行采样 n 个点,那么在扫描线上就呈现出 $P_1, P_2, P_3, \dots, P_{n-1}, P_n$ 的 n 个采样点,并且每一个相邻采样点对于扫描结构来说转动的角度相同均为 θ , d_1, d_2, d_3 为相邻采样点之间的间距, D_1, D_2 为采样点到垂心 O 的距离。

$$d_i = \begin{cases} \tan\left[\frac{\gamma}{2} - \frac{\gamma(i-1)}{n-1}\right] \times H - \tan\left(\frac{\gamma}{2} - \frac{\gamma i}{n-2}\right) \times H, & \left(i = 1, 2, \dots, \frac{n-1}{2}\right) \\ \tan\left(\frac{\gamma i}{n-1} - \frac{\gamma}{2}\right) \times H - \tan\left[\frac{\gamma(i-1)}{n-1} - \frac{\gamma}{2}\right] \times H, & \left(i = \frac{n+1}{2}, \frac{n+3}{2}, \dots, n-1\right) \end{cases} \quad (7)$$

可以看出,相邻采样点之间间距不是相等的,而是从 P_1 到 P_n 间距呈现先变小后边大的规律。虽然采样点之间的间距不相等,但是可以凭公式(7)计算出每个采样点相对于垂心 O 的高精度坐标。

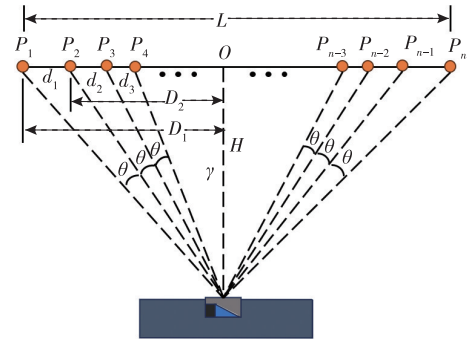


图4 一维扫描采样

扫描线长度 L 和扫描结构距离扫描线的垂距 H 以及视场角度 γ 有如下关系,即:

$$L = 2 \times \tan \frac{\gamma}{2} \times H \quad (1)$$

由于一行采集 n 个点,每个相邻点之间电机转动角度 θ 与 γ 的关系为:

$$\theta = \frac{\gamma}{n-1} \quad (2)$$

采样点 P_1 与垂心 O 的距离 D_1 为:

$$D_1 = \tan \frac{\gamma}{2} \times H \quad (3)$$

采样点 P_2 与垂心 O 的距离 D_2 为:

$$D_2 = \tan\left(\frac{\gamma}{2} - \theta\right) \times H = \tan\left(\frac{\gamma}{2} - \frac{\gamma}{n-1}\right) \times H \quad (4)$$

则采样点 P_1 与采样点 P_2 的距离 d_1 为:

$$d_1 = D_1 - D_2 = \tan\left(\frac{\gamma}{2}\right) \times H - \tan\left(\frac{\gamma}{2} - \frac{\gamma}{n-1}\right) \times H \quad (5)$$

同理可得,采样点 P_2 与采样点 P_3 的距离 d_2 为:

$$d_2 = \tan\left(\frac{\gamma}{2} - \frac{\gamma}{n-1}\right) \times H - \tan\left(\frac{\gamma}{2} - \frac{\gamma}{n-2}\right) \times H \quad (6)$$

根据此规律就可计算出相邻采样点之间的间距为:

2.2 二维扫描采样

根据相邻采样点之间的间隔依次求出所有采样点的横坐标之后,在一维扫描的基础上加上纵向运动分量就是二维扫描。并且纵向扫描原理与横向扫描原理相同,均采用等时间扫描采样,因此采

样点纵坐标计算与横坐标相同。二维扫描采样如图5所示, O' 为二维扫描结构在扫描平面上的垂心, H 为二维扫描结构距离扫描平面的垂距, 扫描结构纵向采样 m 个点, 那么在扫描平面上就呈现出纵向采样点 $K_1, K_2, K_3, \dots, K_{m-1}, K_m$, 相邻采样点对于扫描结构的转动角度相同为 δ , 纵向扫描线长度为 W , 视场角度为 φ , s_1, s_2 为图中纵向相邻采样点之间的间距, S_1, S_2 为纵向采样点到垂心 O' 的距离。

根据一维扫描结构推出 K_1 和 K_2 之间的间隔 s_1 为:

$$s_1 = S_1 - S_2 = \tan\left(\frac{\varphi}{2}\right) \times H - \tan\left(\frac{\varphi}{2} - \frac{\varphi}{m-1}\right) \times H \quad (8)$$

$$d_i = \begin{cases} \tan\left[\frac{\varphi}{2} - \frac{\varphi(i-1)}{m-1}\right] \times H - \tan\left(\frac{\varphi}{2} - \frac{\varphi i}{m-2}\right) \times H, & \left(i = 1, 2, \dots, \frac{m-1}{2}\right) \\ \tan\left(\frac{\varphi i}{m-1} - \frac{\varphi}{2}\right) \times H - \tan\left[\frac{\varphi(i-1)}{m-1} - \frac{\varphi}{2}\right] \times H, & \left(i = \frac{n+1}{2}, \frac{n+3}{2}, \dots, m-1\right) \end{cases} \quad (9)$$

纵向采样点之间的间距变化也与横向采样点相同, 呈现先变小后边大的规律。因此, 根据横向和纵向采样点的间距公式可以将扫描平面采样点的横坐标和纵坐标精确表示出来, 横坐标如公式(10)所示。

$$D_i = \begin{cases} \tan\left[\frac{\gamma}{2} - \frac{\gamma}{n-1}(i-1)\right] \times H, & \left(i = 1, 2, \dots, \frac{n-1}{2}\right) \\ \tan\left[\frac{\gamma}{n-1}\left(i - \frac{n+1}{2}\right)\right] \times H, & \left(i = \frac{n+1}{2}, \frac{n+3}{2}, \dots, n\right) \end{cases} \quad (10)$$

纵坐标如公式(11)所示。

$$S_j = \begin{cases} \tan\left[\frac{\gamma}{2} - \frac{\gamma}{m-1}(j-1)\right] \times H, & \left(j = 1, 2, \dots, \frac{m-1}{2}\right) \\ \tan\left[\frac{\gamma}{m-1}\left(j - \frac{m+1}{2}\right)\right] \times H, & \left(j = \frac{m+1}{2}, \frac{m+3}{2}, \dots, m\right) \end{cases} \quad (11)$$

可以看到, 通过等时间扫描采样的方法能够精确表示出扫描平面采样点的坐标, 这为后续进行温度补偿以及数据处理提供了极大的便利, 并且该扫描方式具有较大的视场角度。

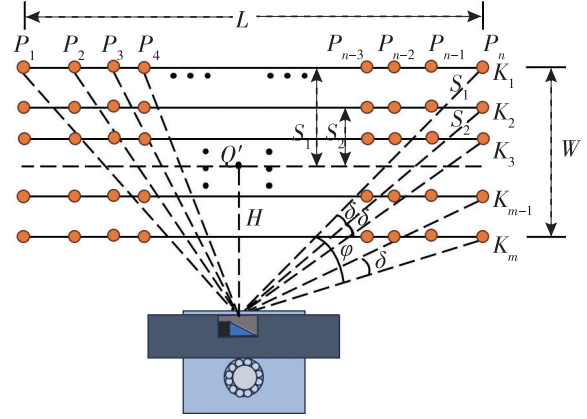


图5 二维扫描采样

同理可以计算出纵向采样点之间的间距为:

3 温度补偿与图像处理

3.1 基于距离和角度的温度补偿方法

红外测温主要是红外传感器检测物体发出的辐射量, 但是在实际环境中系统接收到的辐射包括目标的辐射、大气的辐射等^[11-12], 导致测温不准确。本文采用基于距离和角度的温度补偿, 距离指扫描结构到扫描平面垂心的距离, 角度指扫描结构扫描采样点时相对垂心的横向转动角度和纵向转动角度。扫描结构针对采样点的温度补偿如图6所示, D 和 S 是采样点相对于扫描平面垂心的横向距离和纵向距离, α 是横向转动角度, β 是纵向转动角度, Z 表示扫描结构到相对于垂心 O' 向采样点 P 方向横向转动 α 后的坐标的距离, Q 为扫描结构到采样点 P 的距离, 其余符号与上一节提到的含义一致。

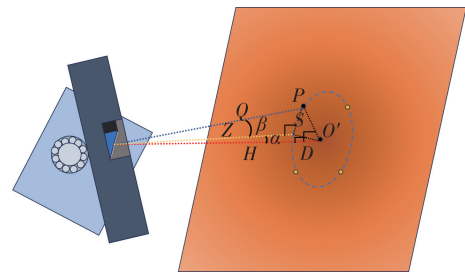


图6 温度补偿原理

采样点 P 到垂心 O' 的距离为 $\sqrt{D^2 + S^2}$, 那么扫描结构到采样点的距离 Q 表示为:

$$Q = \sqrt{H^2 + D^2 + S^2} \quad (12)$$

横向转动角度 α 和纵向转动角度 β 可表示为:

$$\cos \alpha = \frac{H}{Z} \quad (13)$$

$$\cos \beta = \frac{Q}{Z} \quad (14)$$

那么扫描结构到采样点的距离 Q 可表示为:

$$Q = \frac{H}{\cos \alpha \cos \beta} \quad (15)$$

采样点 P 到垂心 O' 的距离又可以表示为:

$$\sqrt{D^2 + S^2} = \sqrt{\frac{H^2}{\cos^2 \alpha \cos^2 \beta} - H^2} \quad (16)$$

因此,采样点 P 到扫描平面垂心 O' 的距离可以用扫描结构到扫描平面垂心的距离 H 、横向转动角度 α 和纵向转动角度 β 表示,距离和角度影响着采样点的温度补偿。同时在图6中可看到,当以垂心为圆心,垂心到采样点为半径画圆时,有三个在圆上的黄色采样点与采样点 P 关于垂心对称。这三个点的距离 H 、横向转动角度 α 和纵向转动角度 β 与采样点 P 相同,因此和采样点 P 有相同的补偿特性,在进行温度补偿时无需重复选取。这极大提高了温度补偿的效率,也是所提温度补偿方法的一个优势。

3.2 基于双线性插值的图像映射

双光谱扫描系统采用等时间采样方法,通过传感器分别采集红外与可见光图像并生成图片。然而,由于红外与可见光传感器的采集速率存在差异,所生成图像的分辨率也有所不同。可见光传感器的采集速率更高。因此,相较于红外图像,可见光图像具有更高的分辨率。红外与可见光图像的具体像素情况如图7所示, L 和 W 分别表示扫描视场的长度与宽度,橙色小球代表红外传感器采集的温度像素点,蓝色小球代表可见光传感器采集的灰度像素点。

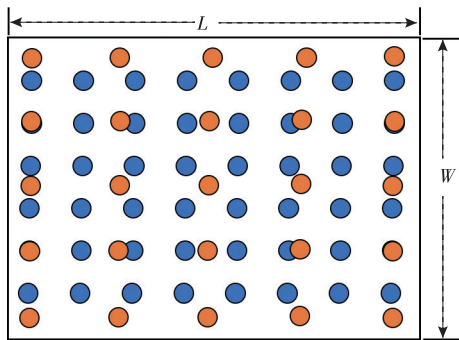


图7 红外和可见光像素位置

从图中可以看出,红外与可见光像素点的密度不同,二者并非一一对应关系,这导致温度数据无

法直接映射到可见光图像上。当用户在上位机查看时,难以直观地观察温度与可见光图像之间的对应关系。因此,需要通过图像映射方法,将红外图像与可见光图像的分辨率统一。然而,双线性插值是在二维空间上通过连续的线性加权,对相邻采样点数值进行过渡的插值来实现^[13],具有计算代价不高,同时能够有效避免插值结果出现锯齿状失真,在保证效率的同时显著提升插值结果的平滑度与连续性,非常符合本系统的图像映射需求。因此,采用双线性插值方法来进行红外和可见光的图像映射。双线性插值图像映射的示意图如图8所示,前方的平面图像为原始红外温度图像的像素点,后方的平面图像为经双线性插值处理后的红外温度图像像素点。

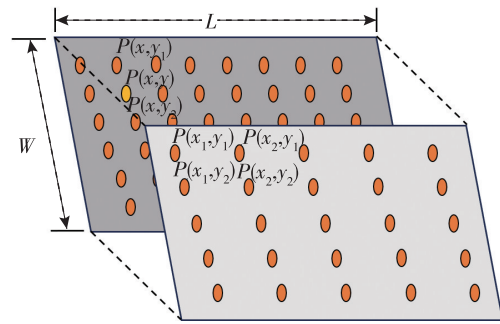


图8 双线性插值图像映射

通过双线性插值处理,红外温度图像的分辨率提升至与可见光图像一致,从而实现温度数据向可见光图像的映射。图中注释了一组红外温度采样点原始数据,即 $P(x_1, y_1)$, $P(x_1, y_2)$, $P(x_2, y_1)$, $P(x_2, y_2)$,处于后方平面的黄色圆点是需要插入的温度数据 $P(x, y)$ 。那么要得到黄色圆点目标红外温度像素点,需要在横向进行两次插值,在纵向进行一次插值。

首先计算横向的线性插值得到 $P(x, y_1)$ 和 $P(x, y_2)$,即:

$$P(x, y_1) \approx \frac{x_2 - x}{x_2 - x_1} P(x_1, y_1) + \frac{x - x_1}{x_2 - x_1} P(x_2, y_1) \quad (17)$$

$$P(x, y_2) \approx \frac{x_2 - x}{x_2 - x_1} P(x_1, y_2) + \frac{x - x_1}{x_2 - x_1} P(x_2, y_2) \quad (18)$$

再计算纵向的线性插值得到 $P(x, y)$,即:

$$P(x, y) \approx \frac{y_2 - y}{y_2 - y_1} P(x, y_1) + \frac{y - y_1}{y_2 - y_1} P(x, y_2) \quad (19)$$

$P(x_1, y_1), P(x_1, y_2), P(x_2, y_1), P(x_2, y_2)$ 的横纵坐标距离为 1, 将公式 (17) 和 (18) 代入公式 (19) 得:

$$\begin{aligned} P(x, y) = & P(x_1, y_1)(x_2 - x)(y_2 - y) + \\ & P(x_2, y_1)(x - x_1)(y_2 - y) + \\ & P(x_1, y_2)(x_2 - x)(y - y_1) + \\ & P(x_2, y_2)(x - x_1)(y - y_1) \end{aligned} \quad (20)$$

由公式 (20) 就可得到目标黄色圆点的像素值, 之后通过遍历的方法可将红外温度图像分辨率补齐到与可见光图像分辨率一致, 将红外温度数据映射到可见光图像。

4 实验结果与分析

本系统采集红外与可见光双光谱图像, 并与 EasIR 手持红外热成像仪进行对比, 通过双光谱图像位置映射及视场角等实验展开分析。EasIR 红外热像仪采用探测元尺寸为 160×120 的红外焦平面传感器, 同时 EasIR 还内置 CMOS 传感器, 用于采集可见光图像。由于市面上大部分双光谱成像仪也是采用 EasIR 这种结构, 选用 EasIR 热像仪做实验对比具有参考意义。实验在白天室内正常光照环境下进行, 以蜡烛作为热源, 通过采集的图像进行实验对比。

将蜡烛放置在参考平面的中心位置进行双光谱图像采集, 如图 9 和图 10 所示。图 9 是本系统采集的双光谱图像, 左侧是可见光图像, 右侧是红外图像。图 10 是 EasIR 热像仪采集的图像, 左侧为可见光图像, 右侧为红外图像。

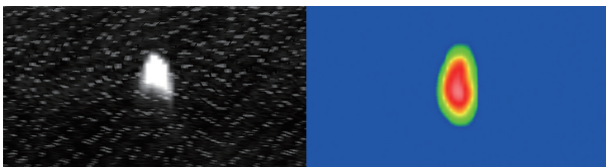


图 9 单根蜡烛的系统采集图像



图 10 单根蜡烛的 EasIR 采集图像

图 11 和图 12 为将两根蜡烛放置在参考平面中间位置的双光谱图像。

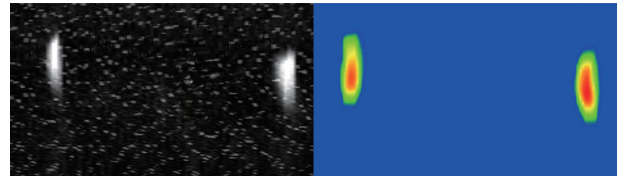


图 11 两根蜡烛位于中间的系统采集图像

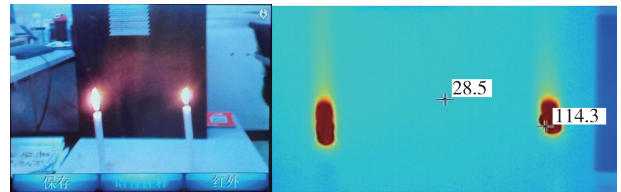


图 12 两根蜡烛位于中间的 EasIR 采集图像

图 13 和图 14 为将两根蜡烛放置在参考平面偏下方位置的双光谱图像。

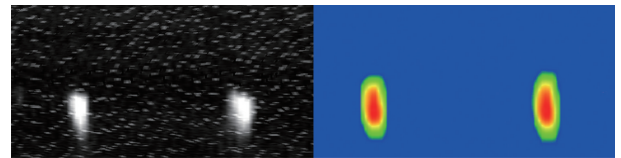


图 13 两根蜡烛位于下方的系统采集图像

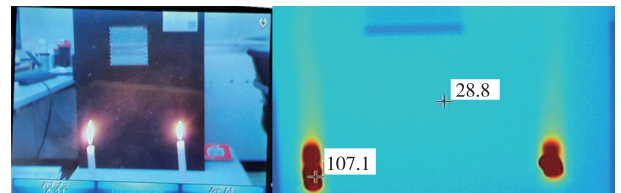


图 14 两根蜡烛位于下方的 EasIR 采集图像

实验主要通过三个参数对本文系统与 EasIR 热像仪进行性能对比: 红外图像和可见光图像的定位误差、红外和可见光图像的视场角度比、红外测温平均误差。

为验证红外映射图像和可见光图像的定位误差, 主要通过对比红外和可见光图像蜡烛火焰中心相对于图像的整体位置, 具体方法如下所示。其中, x_r, y_r 分别为红外图像火焰中心特征点的归一化横坐标和纵坐标, x_v, y_v 分别为可见光图像火焰中心特征点的归一化横坐标和纵坐标, X_r, Y_r 分别为红外图像火焰中心特征点的横坐标和纵坐标, X_v, Y_v 分别为可见光图像火焰中心的横坐标和纵坐标, L_r, W_r 分别为红外图像横向和纵向分辨率, L_v, W_v 分别为可见光图像横向和纵向分辨率, E_p 表示红外图像和可见光图像的定位误差。因此, 定位误差越小, 表示红外图像与可见光图像像素点之间的映射度越好^[14]。红外图像和可见光图像特征点的归一化坐标可用公式 (21) 和 (22) 表示。

$$\begin{cases} x_r = \frac{X_r}{L_r} \\ y_r = \frac{Y_r}{W_r} \end{cases} \quad (21)$$

$$\begin{cases} x_v = \frac{X_v}{L_v} \\ y_v = \frac{Y_v}{W_v} \end{cases} \quad (22)$$

在得到特征点的归一化坐标之后,通过归一化横纵坐标误差的平方和得到定位误差,即:

$$E_p = \sqrt{(x_r - x_v)^2 + (y_r - y_v)^2} \quad (23)$$

图像的定位误差如表1所示。

表1 定位误差

系统	蜡烛位置	可见光坐标	红外坐标	定位误差
本文扫描系统	图9	(0.504, 0.532)	(0.511, 0.502)	0.031
	图11(左)	(0.163, 0.602)	(0.155, 0.594)	0.011
	图11(右)	(0.875, 0.521)	(0.902, 0.513)	0.028
	图13(左)	(0.239, 0.374)	(0.256, 0.391)	0.024
	图13(右)	(0.773, 0.380)	(0.759, 0.398)	0.023
EasIR热像仪	图10	(0.483, 0.542)	(0.552, 0.523)	0.072
	图12(左)	(0.324, 0.497)	(0.174, 0.402)	0.178
	图12(右)	(0.717, 0.516)	(0.784, 0.437)	0.104
	图14(左)	(0.351, 0.264)	(0.163, 0.132)	0.230
	图14(右)	(0.655, 0.271)	(0.761, 0.152)	0.160

由上表可知,本系统定位误差最高为0.031,从图9、图11、图13采集到的蜡烛火焰双光谱图像也可以看出火焰位置是对应的,这是因为本质上可见光传感器和红外传感器采集的光线属于同一光路。EasIR热像仪定位误差最小为0.072℃,比本系统最大定位误差的两倍还多,并且定位误差跨度较大,最大可达到0.23,从图12和14也可以看出红外图像和可见光图像的蜡烛火焰位置差别过大,并不是一一对应的。因此,本系统无需配准就可将采集的物体红外图像映射到可见光图像中,实现了有效映射。而EasIR对于位于参考平面中心的物体基本能够实现有效映射,但对于处于参考平面边缘或非中心位置的物体则难以做到准确映射,需通过后期配准操作加以修正。

从视场角度出发,对比本系统与EasIR热像仪在红外与可见光图像方面的表现,表2列出了本系统和EasIR热像仪的视场角度和视场角度比数据。视场角度比指红外图像与可见光图像水平和垂直视场角的比值,视场角度比越接近1,表明红外和可见光图像水平和垂直视场角越接近,也是红外和可见光图像采集范围一致性的体现。

表2 本系统与EasIR热像仪的视场角度比

扫描系统		可见光视场角	红外视场角	视场角度比
本文	水平	60.53°	60.11°	0.99
	垂直	34.27°	33.45°	0.97
EasIR热像仪	水平	64.32°	31.78°	0.49
	垂直	55.34°	17.05°	0.31

可以看出,本系统垂直和水平视场角度比都非常接近1,从采集到的红外和可见光图像中也可以看出,视场角度基本一致。而EasIR热像仪由于红外和可见光传感器尺寸不一致,采集到的红外和可见光图像水平和垂直视场角度比差距过大,从EasIR采集到的图像中也可以看出明显差异。因此,本系统采集的红外和可见光图像视场一致性更好。

综上所述,本系统采集的双光谱图像无需配准便可将红外图像映射到可见光图像,系统还可以自定义视场角度且具有较大的视场。因此,本系统在视场大小、视场一致性方面都优于EasIR热像仪。并且由于本系统使用单元红外和可见光传感器,而EasIR等传统热像仪使用阵列的红外和可见光传感器,前者成本远低于后者。

通过采集黑体温度信息来观察测温精度,将测量设备放置在距离黑体25 cm处进行300℃左右的温度测量,并计算出平均误差。表3为扫描系统和EasIR热像仪采集黑体温度情况。

表3 温度测量误差值

采样点温度/℃	扫描系统/℃	EasIR热像仪/℃	扫描系统误差/℃	EasIR热像仪误差/℃
295	297	302	2	7
299	298	295	1	4
300	301	305	1	5
301	304	310	3	9
303	305	315	2	12
300	302	316	2	16
300	300	305	0	5
298	299	289	1	9
296	295	285	1	11

通过平均误差 E_t 当作温度测量的评价标准^[15], E_t 的计算式为:

$$E_t = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |t_{ir} - t_i|, (i = 1, 2, \dots, N) \quad (24)$$

式中, N 为采样点个数, t_{ir} 为设备测量温度, t_i 为黑体温度, i 为采样点。

本系统平均误差为1.44℃,EasIR热像仪误差为8.67℃,扫描系统测量的温度平均误差相较

EasIR热像仪下降了 7.23°C ,因此本文扫描系统测温精度更高。

5 总结

本文设计了一种红外和可见光的双光谱扫描成像系统。系统采用集成红外和可见光单元传感器的光路结构采集光信息,并通过两个电机的旋转实现等时间采样,将“点”转换成“线”,“线”转化成“面”,实现红外和可见光的图像采集。在温度采集方面,使用基于距离和角度的温度补偿方法实现高精度温度测量,同时使用双线性插值的图像映射方法将红外信息映射到可见光图像。由于本系统使用单元红外和可见光传感,两路图像无需配准便可将红外图像映射到可见光图像,并且扫描系统通过电机驱动反光镜旋转来采集图像,此种扫描方式具有较大的视场,视场角度还可以自定义。本系统使用单元红外和可见光传感器,整体硬件成本较低,具有广阔的应用前景。

参考文献:

- [1] Zhang H, Wang H, Tian X, et al. P2Sharpen: a progressive pansharpening network with deep spectral transformation [J]. Information Fusion, 2023, 91: 103-122.
- [2] Liu X, Liu Q, Wang Y. Remote sensing image fusion based on two-stream fusion network [J]. Information Fusion, 2020, 55: 1-15.
- [3] Xu H, Ma J. EMFusion: an unsupervised enhanced medical image fusion network [J]. Information Fusion, 2021, 76: 177-186.
- [4] 李庆庆. 基于多层信息提取和传递的红外与可见光图像融合研究[D]. 长春: 中国科学院大学(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所), 2022.
Li Qingqing. Research on Infrared and Visible Image Fusion Based on Multilevel Information Extraction and Transmission [D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2022.
- [5] Zhang X. Deep learning-based multi-focus image fusion: a survey and a comparative study [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2022, 44(9): 4819-4838.
- [6] Karim S, Tong G, Li J, et al. Current advances and future perspectives of image fusion: a comprehensive review [J]. Information Fusion, 2023, 90: 185-217.
- [7] 李康洁, 瞿建齐, 边丽衢. 广域高分辨成像系统研究进展[J]. 光学学报(网络版), 2025, 2(16): 45-74.
Li Lianjie, Zi Jianqi, Bian Liheng. Advances in wide-field high-resolution imaging systems [J]. Acta Optica Sinica (Online), 2025, 2(16): 45-74.
- [8] Onose M. Renewal design concept of mechanical scanning imager [C]// Proceedings of the International Society for Photogrammetry and Remote Sensing, 2000: 211-216.
- [9] Wang Y, Li X, Zhang H. A review of dual-band infrared-visible imaging systems: architectures, sensors, and applications [J]. Sensors, 2023, 23(15): 6789.
- [10] 简献忠, 张会林, 王朝立, 等. 基于等角度与等时间采样技术扫描成像系统[J]. 光子学报, 2005, 34(3): 438-441.
Jian Xianzhong, Zhang Huilin, Wang Zhaoli, et al. Study of a scanning and imaging system based on uniform angle sampling and uniform time sampling technology [J]. Acta Photonica Sinica, 2005, 34(3): 438-441.
- [11] Zhu J, Wang B T, Liang T, et al. A high-precision temperature measurement method through correcting reflected radiation under high-temperature background [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2023, 72: 9508808.
- [12] Wei Y, Sun B, Sun X, et al. Research on the correction method of reflected energy in radiation temperature measurement [J]. Infrared Physics & Technology, 2022, 127: 104378.
- [13] 陈良, 高成敏, 冉峰. 双线性插值算法的优化与实现[J]. 中国图象图形学报, 2008, 13(5): 892-896.
Chen Liang, Gao Chengmin, Ran Feng. Optimization and implementation of bilinear interpolation algorithm [J]. Journal of Image and Graphics, 2008, 13(5): 892-896.
- [14] 苏炜, 龚俊斌. 多源图像配准误差与像素映射一致性关系研究[J]. 光学学报, 2019, 39(7): 142-150.
Su Wei, Gong Junbin. Research on relationship between multi-source image registration error and pixel mapping consistency [J]. Acta Optica Sinica, 2019, 39(7): 142-150.
- [15] 李云红, 曹彬, 苏雪平, 等. 红外阵列成像精确测温及温度补偿[J]. 红外与激光工程, 2024, 53(10): 20240269.
Li Yunhong, Cao Bin, Su Xueping, et al. Infrared array imaging for precise temperature measurement and temperature compensation [J]. Infrared and Laser Engineering, 2024, 53(10): 20240269.

作者简介:

代少升(1974—),男,河南省潢川县人,博士,教授,主要从事红外成像系统及SOPC嵌入式系统设计与开发;

刘润泽(2001—),男,硕士研究生,主要从事红外测温成像研究以及嵌入式硬件开发。