光电技术及应用

DOI：10.16818/j.issn1001－5868.20250605002

基于红外-可见光双波段的扫描型宽视场成像方法

代少升[1]，郑　昭[1]，陈昌川[1]，蒋大川[2*]

（1. 重庆邮电大学 通信与信息工程学院，重庆 400065；2. 中国测试技术研究院，成都 610021）

摘　要： 针对目前红外成像设备中可见光与红外波段成像分辨率低、视场小以及图像位置映射关系不一致等问题，提出一种基于红外-可见光双波段的扫描型宽视场成像方法。该方法首先使用阵列传感器采集物体的可见光波段图像，使用单元红外探测器感应目标的红外热辐射，并通过电机驱动，以线扫描方式实现红外波段成像；然后根据可见光像素均匀分布与红外像素等角度分布的特点，在像素世界坐标系上实现正圆切割映射；最后利用扫描角度温度模型对红外图像进行温度补偿。结果表明，所提方法可以有效同步的采集可见光与红外波段图像，使可见光与红外图像在长、宽视场角度上具有1:1的映射比，对红外与可见光双波段成像推广应用具有参考意义。

关键词： 双波段；红外可见光；宽视场；温度补偿；扫描

中图分类号： TP391.41　**文章编号：** 1001－5868(2025)05－0884－08

Scanning Wide-Field Imaging Method Based on Infrared and Visible Wavelengths

DAI Shaosheng[1], ZHENG Zhao[1], CHEN Changchuan[1], JIANG Dachuan[2]

(1.School of Communications and Information Engineering, Chongqing University of Posts and Telecommunications, Chongqing 400065, CHN; 2.National Institute of Measurement and Testing Technology, Chengdu 610021, CHN)

Abstract: Current infrared imaging devices have narrow fields of view and exhibit low resolutions and inconsistent image mapping between visible light and infrared bands. To mitigate these limitations, in this study, a scanning-based wide-field imaging method that uses infrared - visible dual-band wavelengths is proposed. In this method, first, an array sensor captures the visible-light images of an object; then, a single infrared detector detects the infrared thermal radiation of the target, facilitating its infrared imaging via motor-driven line scanning. Subsequently, a circular-cut mapping analysis is performed, based on the uniform visible-light and equiangular-infrared pixel distributions, in the pixel world coordinate system. Finally, temperature compensation is applied to the infrared image using a scanning angle - temperature model. The experimental results show that this method can effectively synchronize the capture of visible and infrared images, achieving a 1:1 mapping ratio in both the width and field of view. This study provides a reference for the broader application of infrared - visible dual-band imaging in various fields.

Key words: dual-band; infrared - visible light; wide field of view; temperature compensation; scanning

收稿日期：2025－06－05.

基金项目：重庆市科技创新重大研发项目(CSTB2024TIAD-STX0044).

* **通信作者：**蒋大川

0　引言

随着红外成像技术研究的深入，热成像设备在工业、医疗、航天等多个领域均有应用[1-3]。物体表面的温度信息可以直观地由红外图像体现，细节部分则可通过可见光图像清晰、准确地展示[4]。在实际应用中，热成像设备不仅需要直观体现物体的温度信息，还需要详细呈现物体的细节特征，以供使用者准确判断物体当前的状态。因此，同时采集红外波段与可见光波段的图像是很有必要的[5-6]。

针对目前可见光与红外波段的成像，已有多种光学系统设计方案被提出。褚翔等提出利用特定属性的透镜或棱镜进行组合，采集可见光与红外波段图像[7]。宣斌等提出使用多组双胶合透镜消除色差，同时在特定组透镜中采用非球面来提高成像质量[8]。Flueraru等利用分光器得到可见光与红外两路光源，每路光源搭配两组高分辨率数字微镜器对光源进行差分采集，从而实现双波段成像[9]。此外，另一种方案是使用感光阵列与红外阵列传感器进行组合的双光相机，对同一待测区域进行双波段成像[10]。Hines等将160×120的阵列红外传感器嵌入到手机摄像头模组中，利用图像配准技术实现对红外与可见光波段的成像[11]。刘志豪等使用四组不同波段的阵列传感器采集同一光轴下的四路光源，对可见光机芯进行盲元校正，对红外机芯进行低频非均匀性校正，以提高双波段图像的质量[12]。然而，上述方法形成的双波段图像分辨率较低，成像视场角度受限于透镜或者红外传感器的视场角度，且图像之间的也无法做到精准的空间映射。此外，由于测量环境和距离的影响，物体散发的红外辐射量与实际测量辐射量存在偏差[13]。

针对以上问题，本文提出一种基于红外单元探测器与可见光相机同步扫描成像方法。该方法通过红外单元传感器在水平与垂直电机作用下，以从上到下、从左到右的方式扫描可见光阵列，从而同步采集一幅红外波段图像及其对应的可见光波段图像；根据红外与可见光图像扫描成像的特点，在各自的像素坐标系进行正圆切割映射；最后通过扫描角度温度模型对红外图像的温度进行补偿。实验结果表明，所提出的方法能够实现可见光与红外图像在视场角度上的1∶1映射，且红外图像的温度测量平均误差仅为1℃。此外，红外图像像素的温度信息与可见光图像像素的空间细节特征得到有效映射。单元红外探测器代替传统红外感光阵列并结合可见光相机进行扫描的方法，可有效降低系统的构造成本，具有较高的应用推广价值。

1　系统组成与原理

1.1　系统组成

本系统主要由PC电脑与成像设备两部分组成。PC系统上运行QT软件用于处理来自成像设备发送的图像数据，将可见光与红外波段的图像进行补偿整理后输出到电脑屏幕中。随后使用扫描角度温度模型对红外波段温度信息进行补偿。成像系统设备如图1所示，主要包括减速电机、码盘、正圆反射镜、滤波片、聚焦镜头、单元红外传感器与可见光相机。

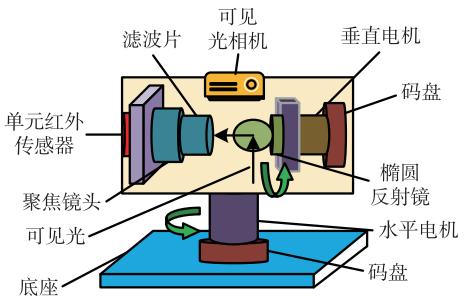


图1　系统组成结构

具体工作流程如下：可见光首先由45°的正圆反射镜反射进入滤波片中，滤除除红外波段的其他波段后进入聚焦镜头，将红外波段的光聚焦在单元红外传感器上，完成单点的红外信息采集；然后在垂直电机的驱动下，带动反射镜旋转，以采集垂直方向的单行红外信息；将可见光相机放置于正圆反射镜之上以保证成像中心位于垂直单行红外采集中心；在水平电机的驱动下，整个设备围绕水平电机旋转，当旋转角度达到可见光相机的水平视场角度一半时，系统完成一幅可见光图像的采集；当达到水平视场角度时，水平电机转向开始下一次往复运动。码盘则记录下各个红外探测点的水平与垂直偏转角度。当水平电机完成水平视场角度的旋转时，将所采集的可见光图像与垂直单行的红外信息以采集顺序进行拼接。随后根据图像像素的世界坐标，通过正圆切割映射将红外波段信息映射在可见光图像上。

1.2　系统原理

系统流程图如图2所示。通过调整可见光相机的物理位置，将其成像中心放置于一维红外扫描线

的中心处，以确保红外与可见光图像中心位于同一位置。然后，从可见光相机阵列的左下角开始，在垂直电机的驱动下，通过正圆反射镜从上到下采集垂直单行红外信息，同时码盘记录每个红外采集点元的角度位置。完成一次单行扫描后，在水平电机的驱动下，按照从左到右的方式开始下一行的红外垂直单行扫描，水平码盘记录偏转角度，直到扫描至可见光阵列的右上角。在完成红外图像与可见光图像的视场同步后，当可见光相机在偏转角度到达水平视场角度一半时，采集一帧图像发送至QT软件中存储。完成扫描后，在PC端的QT软件中将红外波段的单行信息与可见光的波段图像数据按照采集顺序进行拼接，形成宽视场的红外图像和可见光图像，并按照图像的像素世界坐标进行正圆切割映射。最后，按照角度温度模型对红外波段图像进行温度补偿，以完成最终的图像处理。

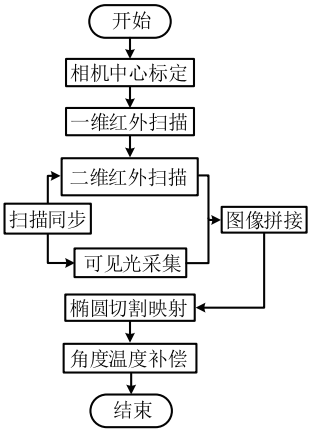


图2 系统流程图

2 阵列多角度扫描成像

2.1 一维红外扫描

红外单元传感器在正圆反射镜和驱动电机的配合下，按照等角度的偏转方式采集垂直方向单行的红外图像信息[14]。为确保采集到的红外点元分布近似均匀分布，在单行垂直红外采集线上分3个等角度的区域。如图3所示为红外单元多角度采集示意图，O点为成像设备，H为成像设备到采集区域垂直距离，d为红外采集点之间的间隔，α_y，ε_y和Δ_y为不同采集角度区域，n_y，m_y和k_y为上述区域的采集点数，θ_y，β_y和γ_y为每次偏转的角度。考虑到采集线关于a_0点对称，故对采集线的下半部分进行分析。

在α_y区域中红外测量点任意相邻两点的间隔

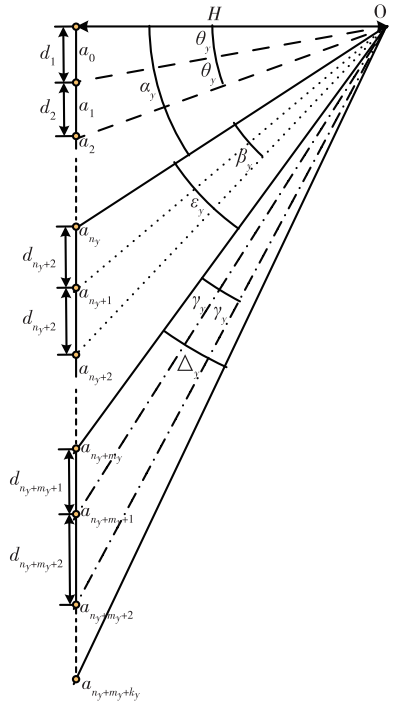


图3 多角度区域的等角度扫描

由公式(1)计算为d_i，其中$i\in[0,n]$。

$$d_i=H\times\left\{\tan\left(i\times\theta_y\right)-\tan\left[\left(i-1\right)\times\theta_y\right]\right\} \quad (1)$$

在ε_y区域内红外测量点任意相邻两点的间隔由公式(2)计算为d_{n+i}，其中$i\in[0,m_y]$。

$$d_{n+i}=H\times\left\{\tan\left(\alpha_y+i\times\beta_y\right)-\tan\left[\alpha_y+\left(i-1\right)\times\beta_y\right]\right\} \quad (2)$$

在Δ_y区域内红外测量点任意相邻两点的间隔由公式(3)计算为d_{n+m+i}，其中$i\in[0,k_y]$。

$$d_{n+m+i}=H\times\left\{\tan\left(\alpha_y+\varepsilon_y+i\times\gamma_y\right)-\tan\left[\alpha_y+\varepsilon_y+\left(i-1\right)\times\gamma_y\right]\right\} \quad (3)$$

则每个测量点距离O点的垂直距离由公式(4)计算为a_{iy}。

$$a_{iy}=\sum_{l=1}^{i}d_l=\begin{cases}H\times\tan\left(i\times\theta_y\right), i=1,2\cdots n_y\\ H\times\tan\left[\left(i-n_y\right)\times\beta_y+\theta_y\right],\\ \quad i=1+n_y,2+n_y\cdots n_y+m_y\\ H\times\tan\left[\left(i-n_y-m_y\right)\times\beta_y+\theta_y+\varepsilon_y\right],\\ i=1+n_y+m_y,2+n_y+m_y\cdots k_y+n_y+m_y\end{cases} \quad (4)$$

2.2 二维红外扫描

当完成单行垂直红外采集线的扫描时，正圆反

射镜旋转一圈发出同步信号，控制水平电机等角度从可见光相机阵列左边缘开始向右边缘顺时针旋转一次，开启下一行垂直红外采集线的扫描。由此反复旋转至可见光相机感光阵列的右边缘，获得一幅二维的红外图像。为确保同一维扫描一致，将整个水平视场区域分为三个区域 α_x，ε_x 和 Δ_x，n_x，m_x 和 k_x 为上述区域的采集点数，θ_x，β_x 和 γ_x 为每次偏转的角度。图 4 为二维红外扫描图，其中，O 点为扫描设备，H 为采集平面到扫描设备的距离，L 为采集平面的一半的宽度，一列黄色圆球组成一条垂直红外采集线，黑色圆球为图像中心。以可见光相机垂直视场 α 为当前红外扫描区域的垂直视场，可见光相机水平视场 ρ 为红外扫描区域的水平视场角度。以图像中心为基准坐标，将水平视场三个区域下的采集点使用同一维垂直视场分析方法，利用公式(5)计算红外平面上任意一点的采集点坐标 (X_j, Y_i)，即：

$$X_j=\begin{cases} H\times\tan\left(j\times\theta_x\right), \left|j\right|\leqslant n_x \\ H\times\tan\left(\left(j-n_x\right)\times\beta_x+\theta_x\right), \\ \qquad n_x<\left|j\right|\leqslant n_x+m_x \\ H\times\tan\left(\left(j-n_x-m_x\right)\times\beta_x+\theta_x+\varepsilon_x\right), \\ \qquad n_x+m_x<\left|j\right|\leqslant k_x+n_x+m_x \end{cases} \tag{5}$$

$$Y_i=\begin{cases} H\times\tan\left(i\times\theta_y\right), \left|i\right|\leqslant n_y \\ H\times\tan\left[\left(i-n_y\right)\times\beta_y+\theta_y\right], \\ \qquad n_y<\left|i\right|\leqslant n_y+m_y \\ H\times\tan\left[\left(i-n_y-m_y\right)\times\beta_y+\theta_y+\varepsilon_y\right], \\ \qquad n_y+m_y<\left|i\right|\leqslant k_y+n_y+m_y \end{cases}$$

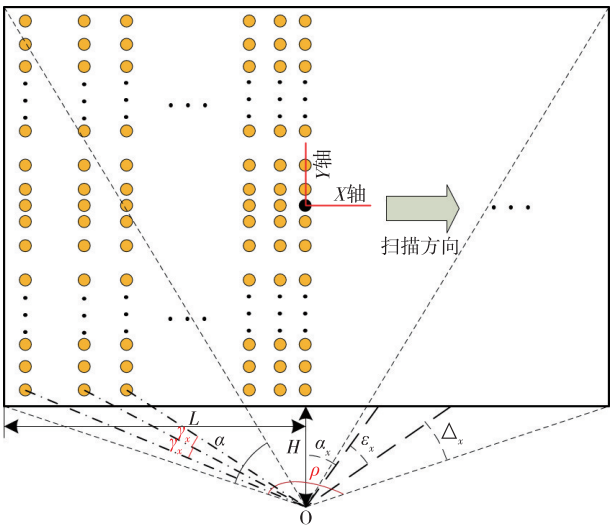


图 4　二维红外扫描图

2.3　可见光图像采集方法

利用感光摄像头采集可见光波段图像，如图 1 所示，通过调整摄像头的物理位置，使其成像中心位于单行红外扫描线的中心处，确保红外采集线位于感光摄像头成像中心处。如图 5 所示为可见光采集图，O 点为扫描仪，红色虚线代表红外垂直单行的红外采集线。在红外扫描的初始阶段，水平码盘的值归零，感光摄像头处于红外扫描线起始处，此时 L1 为相机半个水平视场角度对应的图像。红外采集线在水平电机的带动下，从左至右水平移动。系统实时监控水平电机码盘上的角度值，当在 Q 点时偏转的角度值达到感光摄像头水平视场角度一半，采集一幅可见光图像 L2，此时红外采集线已从当前采集图像的左边缘扫描至图像中心处。在水平电机的驱动下，红外扫描线继续采集图像剩余视场。当码盘角度值达到水平视场角度 ρ 时，红外采集线位于采集图像的右边缘处，完成可见光相机阵列的红外扫描，此刻 L3 为相机半个水平视场角度对应的图像。水平电机反向旋转重复上述流程，再次到达半个水平视场角度 Q 点时更新采集图像。如图 5 的可见光扫描图所示，通过感光相机的不间断的采集，将红外图像采集的区域对应的可见光波段图像按照 1:1 的视场角度记录下来。

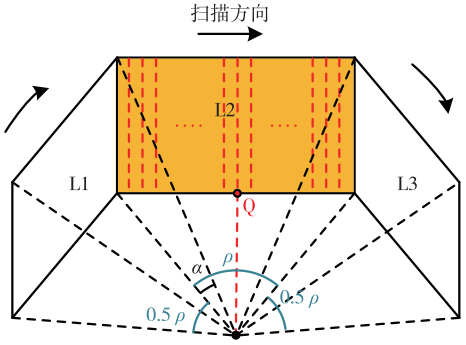


图 5　可见光采集

3　空间映射与温度补偿

3.1　正圆空间映射

如图 6 所示，O 点为红外镜头处，f 为摄像头焦距，H 为摄像头到采集区域的距离，P 为感光颗粒相邻间距。利用直射式三角法，通过公式(6)可计算可见光相邻采集点之间的距离 L_v[15]，即：

$$L_v=\frac{H}{f}\times P \tag{6}$$

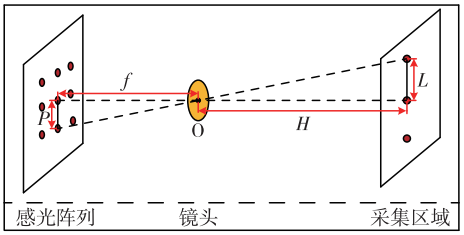


图6 感光阵列像素世界坐标

以焦点处O点对应的感光阵列中心处为原点，则可由公式(7)计算出感光阵列任一点的世界坐标(P_x,P_y)：

$$\begin{cases} P_x = x \times L_v = x \times \dfrac{H}{f} \times P \\ P_y = y \times L_v = y \times \dfrac{H}{f} \times P \end{cases} \tag{7}$$

由于可见光阵列分布为均匀分布，为防止红外波段图像像素分布过于稀疏，以可见光图像采集点距离作为红外图像相邻采集点距离的阈值，确保红外像素分布间隙小于或等于可见光像素分布。将阈值带入公式(1)～(3)得出公式(8)，通过二分法计算出一维和二维扫描各区域的红外采集点数n,m,k，其中Nv_x与Nv_y分别代表可见光阵列水平与纵向分辨率。将一维和二维扫描区域相邻采集点间的角度按照可见光阵列视场角度与分辨率大小进行均分，同时采用线性增加的方法划分不同扫描区域中的相邻采集点间的角度，从而得出$\theta_y=\rho/Nv_y$，$\varepsilon_y=\rho/(2\times Nv_y)$，$\gamma_y=\rho/(3\times Nv_y)$，$\theta_x=\rho/Nv_x$，$\varepsilon_x=\rho/(2\times Nv_x)$，$\gamma_x=\rho/(3\times Nv_x)$。

$$\begin{cases} \dfrac{L}{H} = \tan(n\times\theta) - tan\left[(n-1)\times\theta\right] \\ \dfrac{L}{H} = \tan\left[(n+m)\times\beta\right] - \tan\left[(n+m-1)\times\beta\right] \\ \dfrac{L}{H} = \tan\left[(n+m+k)\times\gamma\right] - \tan\left[(n+m+k-1)\times\gamma\right] \end{cases} \tag{8}$$

通过对相机建模标定相机平面后[16]，再由公式(5)和(7)分别计算出红外图像与可见光图像的世界坐标。然后进行正圆分割映射，将温度信息映射到可见光图像的每一个像素单元上。如图7所示，三角形为红外像素，圆形为可见光像素，由于红外像素分布为近似均匀分布，且分辨率大于可见光像素分辨率，采用正圆切割的方式实现映射。由公式(9)可计算出可见光像素的温度值T，其中以可见光像素为圆心0.5倍L_v为半径r的圆形内红外像素颗粒个数为N，t为每个红外像素点的温度值。

$$T = \frac{\sum_{i=1}^{N} t_i}{N} \tag{9}$$

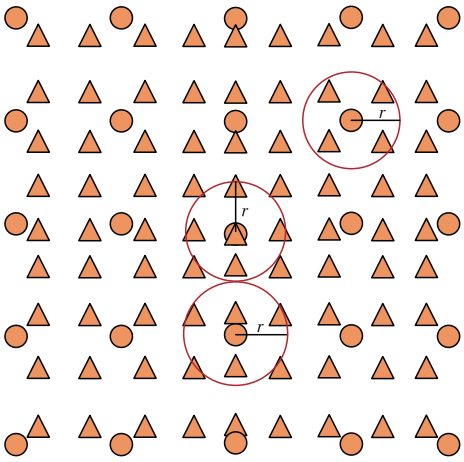


图7 正圆空间映射

3.2 角度温度补偿

任何带有热量的物体都会向外界散发出源源不断的热辐射，红外单元传感器通过热辐射定理采集物体的辐射量转换为实际的温度[17]。传统的红外焦平面阵列由于受到非均匀性的限制，无法进行有效补偿[18]。本系统采取单元扫描的方式，则可以通过扫描角度对非均匀性进行补偿[19]。在红外扫描过程中，由于扫描角度和大气损耗的存在每个测量点元只有部分的热辐射被采集，且角度越大，距离越远所采集到的辐射量越少。如图8所示为红外单元辐射图，O点为红外扫描平面中心，E点为扫描设备，θ_e为红外点源辐射方向与扫描设备采集方向的夹角，Φ_e为红外点源辐射的总能量，Φ_r为扫描设备接收到的总能量，X_j,Y_i代表当前红外点源的坐标点。由此可以得出公式(10)接收总能量与辐射总能量的关系，其中q代表距离损耗系数。

$$\Phi_r = q \times \Phi_e \times \cos\theta_e = q \times \Phi_e \times \frac{H}{\sqrt{X_j^2 + Y_i^2 + H^2}} \tag{10}$$

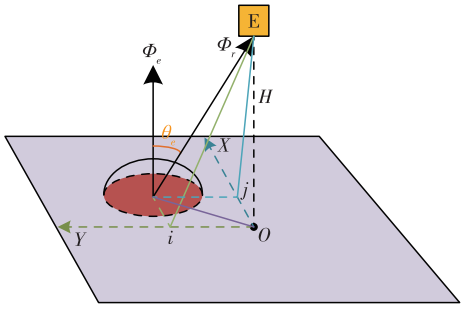
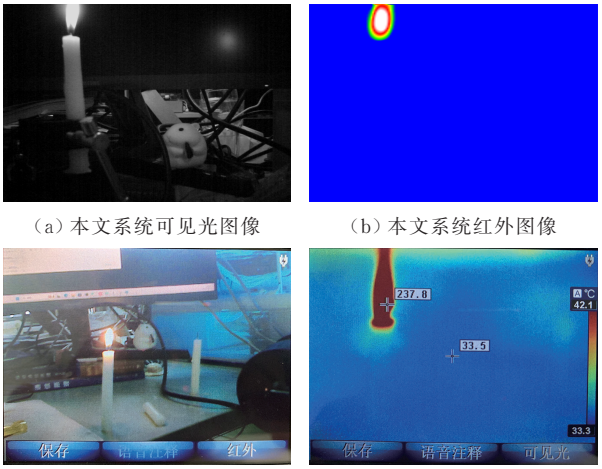


图8 红外单元辐射

4　实验结果及分析

采用以传统焦平面作为红外传感器的 EASIR 第 9 代双波段热成像仪作为系统对比对象，燃烧的蜡烛作为热辐射源，验证可见光与红外双波段的映射成像方法。

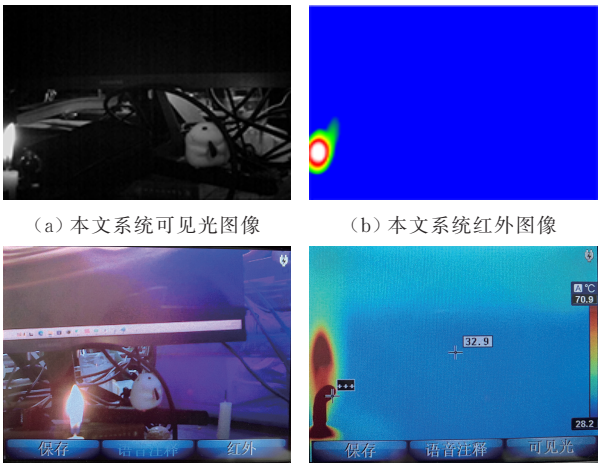
如图 9 和 10 所示，为验证可见光波段与红外波段图像视场一致性，将燃烧的蜡烛分别放置在图像的左上角与左下角。为检测系统的视场大小，将两根燃烧的蜡烛分别放置图像的两侧，如图 11 所示。



（a）本文系统可见光图像　（b）本文系统红外图像

（c）EASIR 9 可见光图像　（d）EASIR 9 红外图像

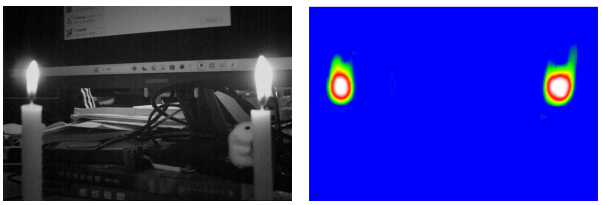
图 9　蜡烛位于左上角



（a）本文系统可见光图像　（b）本文系统红外图像

（c）EASIR 9 可见光图像　（d）EASIR 9 红外图像

图 10　蜡烛位于左下角



（a）本文系统可见光图像　（b）本文系统红外图像



（c）EASIR 9 可见光图像　（d）EASIR 9 红外图像

图 11　蜡烛位于两侧

采用归一化像素坐标验证可见光与红外波段图像中蜡烛的映射位置，由公式（11）表示，其中 x 与 y 分别代表蜡烛火焰中心在图像中的像素坐标，N_x 与 N_y 则代表图像的水平分辨率与垂直分辨率。经过归一化后的可见光与红外图像的各自像素坐标差越小则说明映射更为准确。

$$\begin{cases}\overline{X}=x/N_x\\ \overline{Y}=y/N_y\end{cases} \tag{11}$$

如图 9 和 10 所示，本文系统采集的可见光与红外波段均可有效将蜡烛火焰显示在左上角与左下角。其中如表 1 所示，归一化坐标偏差在 0.006 以内，表明系统的精确度较高。相比之下，使用 EASIR 9 代设备采集的图像，可以明显看出蜡烛火焰在可见光图像与红外图像位置不一致，且归一化坐标偏差达到 0.434，误差值是本系统的 72 倍。如图 11 所示，当蜡烛位于两侧时，本文系统在可见光与红外波段均能采集下蜡烛，而 EASIR 9 代设备的红外波段图像只能采集到位于右侧的单根蜡烛且可见光波段图像两根蜡烛并没有位于两侧，无法做到有效映射。

表 1　归一化坐标误差

不同的系统	蜡烛	可见光(x,y)	红外(x,y)	偏差
本文	图 9	(0.180,0.906)	(0.174,0.903)	(0.006,0.003)
	图 10	(0.048,0.208)	(0.050,0.209)	(0.002,0.001)
	图 11 左	(0.107,0.615)	(0.112,0.617)	(0.005,0.002)
	图 11 右	(0.835,0.618)	(0.831,0.615)	(0.004,0.003)
EASIR 9 代	图 9	(0.437,0.623)	(0.254,0.883)	(0.183,0.251)
	图 10	(0.247,0.187)	(0.088,0.439)	(0.159,0.252)
	图 11 左	(0.091,0.434)	(0.000,0.000)	(0.091,0.434)
	图 11 右	(0.647,0.452)	(0.925,0.817)	(0.278,0.365)

红外与可见光波段的视场角度比是评估实现有效映射的关键，视场角度比越接近 1，则代表图像间的相互映射效果更好。由于本文采用单元传感器按照从左到右、从上到下的方式逐行扫描可见光感光阵列映射的物体表面，可有效解决红外与可见光波段映射不一致的问题。如表 2 所示，本文系统

可见光与红外波段视场角的大小近似相等，视场比为0.98，而EASIR 9代设备红外视场与可见光视场不一致，导致无法实现1∶1映射且本文系统的红外视场角度是其2.5倍。如图5所示，本系统可通过水平视场角度为采集间隔，多次采集可见光与红外波段图像，最后将所采集的L1，L2与L3图像按采集顺序拼接在一起，以达到360°水平宽视场角度的目标监控。

表2 单次可见光与红外图像视场角

参数	本文系统	EASIR 9代
可见光水平视场角	52.11°	65.65
红外水平视场角	52.84°	21.74
水平视场比	0.98	0.33
可见光垂直视场角	40.27°	51.64
红外垂直视场角	40.34°	16.39
垂直视场比	0.99	0.32

由于EASIR 9代使用传统焦平面阵列测量红外辐射，采集红外辐射过程存在角度与距离损耗，无法灵活根据扫描角度进行补偿，而本文采用单元传感器进行扫描成像，可针对每个测量点进行辐射补偿。采用武汉凯尔文公司生产的黑体辐射箱作为模拟热源，测试EASIR 9代与本文经过角度拟合后的各自的温度测量情况，采用平均误差和方差作为评价指标。

$$\bar{\mu}=\frac{\sum_{i=0}^{n}e_i}{n} \tag{12}$$

$$s^2=\frac{\sum_{i=0}^{n}(e_i-\bar{\mu})}{n} \tag{13}$$

式中，$\bar{\mu}$代表平均误差，n代表测量次数，e_i代表系统测量误差，s^2代表方差。如表3所示，经过测量EASIR 9代的平均误差为7.45℃，方差为6.79；本文系统的平均误差为1.09℃，方差为0.63。可以明显对比出通过对每个测量点进行角度补偿后的温度精确度高于传统的阵列传感器测温的精确度。

表3 温度测量 （单位：℃）

黑体辐射	EASIR 9代	本文系统	EASIR 9代误差	本文系统误差
300	308	302	8	2
300	312	301	12	1
320	313	319	7	1
320	315	320	5	0
250	247	249	3	1
250	261	248	11	2
250	257	250	7	0
305	300	307	5	2
298	288	300	10	2
280	288	279	8	1
270	276	270	6	0

5 结论

本文提出一种基于红外-可见光双波段的扫描型宽视场成像方法。通过特定的光学结构驱动红外单元传感器以从左到右、从上到下的扫描方式，从可见光相机的感光阵列映射目标区域的左下角扫描至右上角；结合红外与可见光图像的像素坐标进行正圆切割映射，采取连续间隔采集的方法，有效解决了阵列传感器双波段成像映射视场小、图像位置映射不一致的问题；通过每个测量点测量角度进行红外辐射的温度补偿，极大降低了温度测量的误差。所提方法对红外-可见光双波段成像推广具有参考意义。

参考文献：

[1] 季怡萍，邓先钦，徐 鹏，等. SF_6气体泄漏红外成像检测的技术分析和应用探讨[J]. 红外技术，2022，44(2)：198-204.
Ji Yiping，Deng Xianqin，Xu Peng，et al. Analysis of SF_6 leakage detection using infrared imaging [J]. Infrared Technology，2022，44(2)：198-204.

[2] 张 江. 红外成像在电气设备状态检修中的应用[J]. 中国新技术新产品，2023(23)：41-43.
Zhang Jiang. Application of infrared imaging in condition-based maintenance of electrical equipment [J]. New Technology & New Products of China，2023(23)：41-43.

[3] 周永欢. 基于红外成像技术的锌电解极板故障检测系统[J]. 有色冶金设计与研究，2023，44(4)：23-26.
Zhou Yonghuan. A fault detection system for zinc electrolytic plate based on infrared imaging technology [J]. Nonferrous Metals Engineering & Research，2023，44(4)：23-26.

[4] 梁嘉豪，郭全民，王晗蕾. 可见光与红外图像分区融合的夜视抗晕光方法[J]. 红外技术，2023，45(7)：714-720.
Liang Jiahao，Guo Quanmin，Wang Hanlei. Night vision anti-halation method based on partition fusion of visible and infrared images[J]. Infrared Technology，2023，45(7)：714-720.

[5] 马子轩. 宽谱段可见红外一体化光学系统设计[D]. 西安：中国科学院大学(中国科学院西安光学精密机械研究所)，2021.
Ma Zixuan. Design of wide-spectrum visible-infrared integrated optica system. Xi'an：Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics，Chinese Academy of Sciences，2021

[6] 庞 珊. 基于细节保持与增强的红外与可见光图像融合[J]. 长春工业大学学报，2023，44(6)：539-545.
Pang Shan. Infrared and visible image fusion based on detail preservation and enhancement [J]. Journal of Changchun University of Technology，2023，44(6)：539-545.

[7] 褚 翔，祝连庆，娄小平，等. 基于可见光及近红外的仿生视

觉成像技术[J]. 半导体光电，2017，38(2)：304-308.
Chu Xiang，Zhu Lianqing，Lou Xiaoping，et al. Bionic vision imaging technology based on visible and NIR light [J]. Semiconductor Optoelectronics，2017，38(2)：304-308.

[8] 宣　斌，赵泽宇，罗曜伟，等. 宽光谱可见-短波红外成像光学系统设计[J]. 红外与激光工程，2023，52(4)：210-217.
Xuan Bin，Zhao Zeyu，Luo Yaowei，et al. Design of optical system for wide-spectrum visible-short wave infrared imaging[J]. Infrared and Laser Engineering，2023，52(4)：210-217.

[9] Flueraru C，Pitts O J，Walker A W，et al. Modular implementation of a dual-band imager：visible and SWIR with compressed sensing [C]//2023 IEEE Sensors Applications Symposium (SAS)，2023：1-6.

[10] 孙源文，吴　见，孔德怀，等. 基于双光相机的光融合成像系统设计与实现[J]. 数字通信世界，2024(8)：104-106.
Sun Yuanwen，Wu Jian，Kong Dehuai，et al. Design and implementation of a light fusion imaging system based on dual light cameras [J]. Digital Communication World，2024 (8)：104-106.

[11] Hines J，Wang E，于　啸. 基于长波红外和可见光相机的多光谱成像技术[J]. 红外，2020，41(7)：38-46.
Hines J，Wang E，Yu Xiao. Multispectral imaging technology based on long—wave infrared and visible cameras [J]. Infrared，2020，41(7)：38-46.

[12] 刘志豪，金伟其，李　力，等. 四波段共光轴成像实验平台及其图像融合[J]. 光学精密工程，2022，30(1)：1-11.
Liu Zhihao，Jin Weiqi，Li Li，et al. Four-band coaxial imaging experimental platform and its image fusion methods[J]. Optics and Precision Engineering，2022，30(1)：1-11.

[13] Rayanasukha S，Somboonkaew A，Sumriddetchkajorn S，et al. Self-compensation for the influence of working distance and ambient temperature on thermal imaging-based temperature measurement [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement，2021，70：4506106.

[14] 代少升，吴　帅，贺自强，等. 红外点元探测器扫描成像方法研究[J]. 半导体光电，2022，43(5)：923-929.
Dai Shaosheng，Wu Shuai，He Ziqiang，et al. Research on infrared point element detector scanning imaging method [J]. Semiconductor Optoelectronics，2022，43(5)：923-929.

[15] 陈　哲，王生怀，钟　明. 3D线激光相机的激光条纹中心提取方法[J]. 工具技术，2023，57(10)：155-160.
Chen Zhe，Wang Shenghuai，Zhong Ming. Laser stripe center extraction method for 3D line laser cameras[J]. Tool Engineering，2023，57(10)：155-160.

[16] 杨守瑞，段婉莹，艾文宇，等. 光场相机建模与畸变校正改进方法[J]. 红外与激光工程，2023，52(1)：20220326.
Yang Shourui，Duan Wanying，Ai Wenyu，et al. Light field camera modeling and distortion correction improvement method [J]. Infrared and Laser Engineering，2023，52(1)：20220326.

[17] 李明超，闫　宽，张　聪，等. 用于激光软钎焊温度测量的高精度红外辐射测温装置[J]. 红外技术，2025，47(1)：108-114.
Li Mingchao，Yan Kuan，Zhang Cong，et al. High-precision IR radiation temperature measurement device for laser soldering temperature measurement[J]. Infrared Technology，2025，47(1)：108-114.

[18] 张秋旋，王玮冰，李　佳. 基于补偿算法的红外探测器非均匀性校正[J]. 红外技术，2017，39(7)：621-625.
Zhang Qiuxuan，Wang Weibing，Li Jia. Non-uniformity correction of infrared detector based on compensation algorithm [J]. Infrared Technology，2017，39(7)：621-625.

[19] Zhang Y，Wang Z，Fu X，et al. An experimental method for improving temperature measurement accuracy of infrared thermal imager[J]. Infrared Physics & Technology，2019，102：103020.

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；

蒋大川(1981—)，男，四川省广安市人，高级工程师，主要研究方向为试验鉴定与论证、红外成像处理。