

DOI:10.19650/j.cnki.cjsi.J2412979

# 粉尘干扰下工业物料表面单视角三维热成像方法\*

潘冬,李奕天,马晓路,蒋朝辉,桂卫华  
(中南大学自动化学院 长沙 410083)

**摘要:**三维热成像技术结合了三维重建与红外热成像的优点,能够同时获取物体表面温度分布和几何结构信息,是直观呈现工业物料表面信息的有效手段。然而,在粉尘干扰下单视角成像环境中,常规三维热成像方法难以适用。为此,本文利用红外热像仪和深度相机搭建了三维热成像系统,提出了适用于粉尘干扰下工业物料表面单视角三维热成像方法。首先,建立了基于虚拟成像的联合外参数标定模型,解决单视角成像设备空间同步难的问题。其次,提出了基于辐射测温原理的红外测温近似补偿方法,获取粉尘干扰下误差较小的温度分布。然后,针对单视角三维热成像深度信息缺失和视角遮挡问题,提出了基于深度图绘制和视点优化的单视角三维热成像方法,实现最优视点下被测对象温度与形貌数据的融合。实验结果表明本文方法能够实现粉尘干扰下物料表面单视角三维热成像,保留更多的温度和深度信息,减小了红外测温误差。

**关键词:** 三维热成像;粉尘干扰;单视角;温度补偿;视点优化

**中图分类号:** TN21 TH811 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.80

## Single-view 3D thermography method for industrial material surfaces under dust interference

Pan Dong, Li Yitian, Ma Xiaolu, Jiang Zhaohui, Gui Weihua  
(School of Automation, Central South University, Changsha 410083, China)

**Abstract:** Three-dimensional (3D) thermography technology combines the advantages of 3D reconstruction and infrared thermal imaging, enabling simultaneously acquisition of both the temperature distribution and geometric structure information of an object's surface. It is an effective method to visually present the surface information of industrial materials. However, in the single view imaging environment with dust interference, the conventional 3D thermography method is difficult to apply. Therefore, this paper develops a 3D thermal imaging system using an infrared thermal camera and a depth camera, and proposes a single-view 3D thermal imaging method for the surface of industrial materials under dust interference. Firstly, this paper establishes a joint external parameter calibration model based on virtual imaging to solve the challenge of spatial synchronization in single-view imaging devices. Secondly, based on the principle of radiation temperature measurement, an approximate compensation method for infrared temperature measurement is proposed to obtain the temperature distribution with small error under dust interference. Then, to solve the problem of depth information loss and view occlusion in single-view 3D thermography, a single-view 3D thermal imaging method based on depth map rendering and viewpoint optimization is proposed to achieve fusion of temperature and topography data of the measured object under the optimal view. Experimental results show that the proposed method can effectively realize single-view 3D thermography of the surface of objects under dust interference, retain more temperature and depth information, and reduce infrared temperature measurement errors.

**Keywords:** three-dimensional thermography; dust interference; single-view; temperature compensation; viewpoint optimization

## 0 引言

工业物料是冶金、水泥、火电等工业生产过程中的基础原材料,其表面形貌和温度信息分布是分析生产状态和调控生产过程的重要依据,例如,钢铁工业高炉炼铁工序中高炉内部物料形貌和温度分布是了解高炉运行状况、指导布料操作的重要信息<sup>[1]</sup>。三维热成像结合三维重建<sup>[2-4]</sup>和红外热成像<sup>[5-6]</sup>技术,构造出物体表面三维形貌的温度分布,在工业生产、医学诊断、军事侦察、环境治理、无损检测等领域有广泛应用<sup>[7-8]</sup>,是获取工业物料表面形貌和温度分布的重要手段。

常见的三维热成像方法主要分为两类:利用检测装置获取真实形貌与温度融合的方法和基于软件仿真或有限元分析的方法。利用检测装置直接获取目标场景的真实三维形貌和温度分布,然后将通过信息融合实现三维热成像,是更适用于实际工业应用的方法。潘冬等<sup>[9]</sup>基于激光扫描仪和红外热像仪构建了可解耦的三维热成像系统,并提出基于参考体方向发射率变化的红外测温补偿模型,获取到高保真的三维热成像结果。许宝杯<sup>[10]</sup>利用红外热像仪和深度相机,提出一种用于移动和实时的三维热成像方法,有效地提高了系统三维热成像的鲁棒性。Vidas等<sup>[11]</sup>使用红外相机和深度相机构建手持式三维热成像系统,通过对目标物体进行多个视角连续扫描,实现高精度、实时三维温度场构建。Landmann等<sup>[12]</sup>利用结构光传感器和长波红外相机构建三维热成像系统,将温度分布作为纹理映射到三维点云上,获取了快速移动或者形状变化目标的三维形状与空间温度分布。Cardone等<sup>[13]</sup>利用新型红外靶板对红外热成像设备进行光学校准,重构了高超音速风洞试验中物体的三维温度场,所提方法支持通过估计相机视角提高定向发射率情况下目标温度测量的准确性。通常,利用检测装置实现三维热成像的关键在于多源信息的空间同步,当热像仪与三维传感器位置及方向关系已知时,采用位姿映射的方式将温度和三维点云映射到对方,而当热像仪与三维传感器位姿未知时,需要利用纹理等特征进行匹配,将温度与三维点云融合到一起。基于软件仿真或有限元分析,获取到的三维温度场更多地用于科学计算和分析<sup>[14]</sup>,本文不作详细介绍。

红外热成像方法在工业复杂空间内物体表面温度检测中具有非接触、无有害辐射、可提供二维温度场等优势,但在实际工业应用中,仍需考虑环境因素对红外热成像结果的影响。在工业现场,粉尘、水雾等环境干扰都会对红外热成像的结果造成影响,致使测温结果与物体表面实际温度之间存在较大的偏差,为了满足测温精度要求,需对干扰因素造成的测温误差进行合理补偿。就补

偿方法而言,可以在红外热成像设备中集成校准源和补偿电路<sup>[15]</sup>,利用硬件来克服干扰因素<sup>[16]</sup>,但附加硬件设施往往会增加整个红外热成像设备的成本与复杂性,容易对成像环境引入新的干扰,在空间有限的工业反应器内,也会对正常的物理化学反应造成影响。因此,许多研究人员从软件算法的角度出发,对干扰因素造成的红外测温误差进行补偿<sup>[17-18]</sup>。Zhang等<sup>[19]</sup>针对大气透射率对红外测温的影响,研究了大气中主要成分如水蒸气、二氧化碳等大气因子的辐射特性,构建了长距离测温时针对大气影响的温度补偿模型。Pan等<sup>[20-21]</sup>针对光路上粉尘的影响,分别从红外测温机理和数据驱动建模两个角度构建了红外测温误差补偿模型,一定程度减小了粉尘干扰造成的红外测温误差。

在真实工业生产场景中,粉尘是一种常见干扰因素<sup>[22]</sup>,影响红外测温精度。同时,由于生产工艺的限制,视觉检测装置安装位置在部分场景中受限,只能单视角成像,这给现有三维热成像技术带来了挑战。具体来说,在粉尘干扰下实现工业物料表面单视角三维热成像需要克服以下难点:1)需要对存在成像原理和内参差异的多源设备采集的深度信息和温度信息进行空间同步;2)需要克服粉尘对红外测温的影响;3)需要解决单视角三维热成像在数据融合时的信息损失问题。

针对上述问题,本文提出粉尘干扰下单视角三维热成像方法,建立基于虚拟成像的立体视觉联合外参标定模型,以实现多源图像的空间同步;提出基于辐射测温原理的近似红外测温补偿方法,以克服粉尘的干扰;提出基于深度图绘制和视点优化的三维热成像方法,以实现最优视点下温度与形貌数据融合,具体贡献如下:

1) 建立基于虚拟成像的立体视觉联合外参标定模型,获得参数差异较大的成像设备间的相对外参,实现其空间同步;

2) 提出粉尘干扰下红外测温补偿方法,利用可见光图像获取红外波段粉尘透射率场分布,结合粉尘透射率和红外测温原理,构建近似红外测温补偿模型,获取误差较小的目标场景温度分布;

3) 提出基于深度图绘制和视点优化的三维热成像方法,基于多几何特征求解当前场景下最优成像视点,将深度信息和温度信息在虚拟视点叠加,实现最优视点下温度与形貌数据的融合。

## 1 三维热成像系统设计与标定

### 1.1 三维热成像系统设计

为了模拟单视角数据获取条件,本文将红外热像仪和深度相机以双目立体视觉的方式固定在一起,搭建了多源立体视觉单视角三维热成像系统,如图1所示。红

外热像仪选用 Fluke 公司的 TiX1000,工作波段为 7.5~14  $\mu\text{m}$ ,能从安全距离拍摄目标的红外热图像,达到较远距离下非接触检测目标区域温度分布的效果。深度相机选用 Azure Kinect,它通过对近红外光调制实现调幅连续波时差测距,通过记录光线传播时间间接测量目标距离。红外热像仪和深度相机的具体技术参数见表 1。

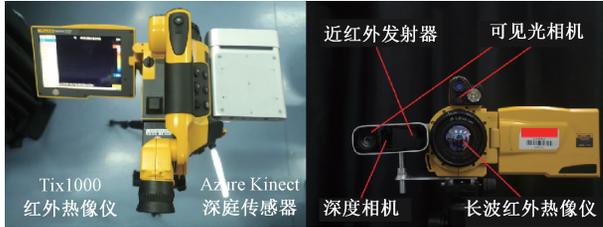


图 1 三维热成像系统组成

Fig. 1 Composition of the 3D thermography system

表 1 Fluke TiX1000 红外热像仪和 Azure Kinect 深度相机技术参数

Table 1 Technical parameters of Fluke Tix1000 and Azure Kinect

设备参数	Fluke Tix1000	Azure Kinect
分辨率	1 024×768	640×576
帧率	30	30
视场角	32.4°×24.7°	75°×65°
量程	-40℃~2 000℃	0.5~3.86 m
测量精度	±1.5%	<0.5 mm

## 1.2 三维热成像系统标定

对于红外热像仪的内参标定,针对普通棋盘格的红外热图像细节特征不明显的问题,本文利用常温下发射率差异显著的白色铝板和黑色哑光漆,制作了如图 2 所示的特殊标定板。在采用均热板对标定板进行加热后,高发射率的黑色哑光漆部分在红外热图像上的表现温度显著高于低发射率的铝板区域,棋盘格红外热图像中角点特征清晰。因此,本文直接采用张正友标定法进行内参标定。



(a) 可见光图像  
(a) Visible light image  
(b) 红外热图像  
(b) Infrared thermal image

图 2 特殊标定板图像

Fig. 2 Image of the special calibration plate

对于深度相机 Azure Kinect 的内参标定,本文将深度相机的视点转换为可见光相机的视点,通过采集多幅可见光图像,利用张正友标定法获取可见光相机内参,并将其作为深度相机的内参数。

在本文构建的以红外热像仪-RGBD 相机为核心的三维热成像系统中,2 台设备在成像原理、分辨率和焦距等方面存在较大差异,无法直接参考双目立体视觉的原理去获取 2 台设备之间的外参关系。为利用双目立体视觉的方式获取红外热像仪和 RGBD 相机之间的外参数,针对红外热图像和深度图在图像层面表现出的差异,将其简化为像素尺度和分辨率的区别。

参考数字变焦原理,通常是将短焦镜头拍摄的图像裁切一圈,再将分辨率缩放到与目标焦距长焦镜头拍摄的图像相同的分辨率,就能获得图像观感上检测目标大小一致的效果。当像素形状为正方形时,假设对待处理图像缩放的比例为  $r$ ,即原图像上坐标为  $(u, v)$  的点在缩放后的图像上坐标为  $(ru, rv)$ ,根据图像坐标系与世界坐标系的关系,在外参  $A = [R | T]$  不变的情况下,新的相机内参中相关参数需要乘以比例  $r$ ,即:

$$K_0 = \begin{bmatrix} rf_x & 0 & rc_x \\ 0 & rf_y & rc_y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

然后,为了方便计算,将等像素尺度的图像中心重合,确保裁剪前后图像的像素中心不发生变化。由于裁剪前后相机在  $x$  轴和  $y$  轴方向上的焦距没有发生变化,记前一个步骤缩放后的图像分辨率为  $w_0 \times h_0$ ,目标图像分辨率为  $w_r \times h_r$ ,则中心裁剪后,相机内参值为:

$$K_0 = \begin{bmatrix} rf_x & 0 & rc_x - (w_0 - w_r)/2 \\ 0 & rf_y & rc_y - (h_0 - h_r)/2 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

根据上述思路,对于分辨率为 1 024×768 的红外热图像和转换视点后分辨率为 1 920×1 080 的深度图,本文仅考虑将红外热图像在像素层面与深度图对齐,对于此类参数差异较大的立体成像设备,提出一种基于虚拟成像的联合外参标定方法。由于构建的三维热成像系统中,红外热像仪成像的有效视场相对较小,为了避免深度图在缩放等变换中深度数据的变化,以深度图为准,将深度图进行裁剪缩放,使其像素尺度、分辨率与红外热图像一致。同时,考虑到深度图裁剪和缩放后的变化,相当于裁剪和缩放后,新的深度图来自另外一台虚拟的深度相机,如此,则新的标定参数实质上是虚拟深度相机的参数。

其中,因成像设备分辨率和视场角等参数不同,具体的标定和配准过程会损失部分可见光相机分辨率,相对取决于低分辨率设备成像范围的三维热成像结果而言,此部分分辨率损失是可以接受的。

## 2 粉尘干扰下红外测温补偿方法

### 2.1 红外测温补偿模型

当光路中不存在粉尘干扰时,红外相机探测器接收的辐射信号主要来自被测对象自身发出的辐射亮度、周围环境的辐射亮度以及大气辐射亮度,转化的电压信号可以表示为:

$$s(T_{\text{inf}}) = \tau_a [\varepsilon_0 s(T_0) + \rho_0 s(T_u)] + (1 - \tau_a) s(T_a) \quad (3)$$

式中:  $T_{\text{inf}}$ 、 $T_0$ 、 $T_u$  和  $T_a$  分别表示无粉尘干扰时红外相机测得的温度、被测对象表面温度、环境温度以及大气温度;  $\varepsilon_0$ 、 $\varepsilon_a$  分别表示被测对象的发射率以及大气发射率;  $\tau_a$  表示大气透射率;  $\rho_0$  表示被测对象的光谱反射率;  $s(\cdot)$  表示物体所发出的辐射信号。

因此,被测对象发出的辐射信号可以表示为:

$$s(T_0) = \frac{1}{\varepsilon_0 \tau_a} s(T_{\text{inf}}) - \frac{\rho_0}{\varepsilon_0} s(T_u) - \frac{1 - \tau_a}{\varepsilon_0 \tau_a} s(T_a) \quad (4)$$

当被测对象所在环境中存在粉尘干扰时,红外相机接收的红外辐射相比于不受粉尘干扰时接收到的红外辐射多了两项红外辐射,分别是来自粉尘的辐射亮度和粉尘反射的红外辐射亮度。此外,粉尘也会导致原有接收到的辐射项变化。因此,在粉尘干扰下红外探测器输出的电压信号可以表示为:

$$s(T_{\text{inf}}) = \varepsilon_0 \tau_a \tau_d s(T_0) + \rho_0 \tau_a \tau_d s(T_u) + \varepsilon_d \tau_a s(T_d) + \rho_d \tau_a s(T_u) + \varepsilon_a s(T_a) \quad (5)$$

式中:  $T_d$  表示粉尘温度;  $\varepsilon_d$ 、 $\tau_d$  和  $\rho_d$  分别表示粉尘的发射率、透射率和反射率。

同理,可得被测对象对外发出的辐射信号为:

$$s(T_0) = \frac{1}{\varepsilon_0 \tau_a \tau_d} s(T_{\text{inf}}) - \frac{\rho_0}{\varepsilon_0} s(T_u) - \frac{\varepsilon_d}{\varepsilon_0 \tau_d} s(T_d) - \frac{\rho_d}{\varepsilon_0 \tau_d} s(T_u) - \frac{\varepsilon_a}{\varepsilon_0 \tau_a \tau_d} s(T_a) \quad (6)$$

结合基尔霍夫定律<sup>[23]</sup>,任何材料的发射率、吸收率和透射率之和为1。特别的是,对于不透明物体,可以将其透射率视为0,如被测对象;对于透明物体,则可以将其反射率视为0,如大气。因此,被测对象的反射率、大气的发射率和粉尘的发射率可以表示为:

$$\rho_0 = 1 - \varepsilon_0, \varepsilon_a = 1 - \tau_a, \varepsilon_d = 1 - \tau_d - \rho_d \quad (7)$$

将式(7)代入到式(4)中,可得:

$$s(T_0) = \frac{1}{\varepsilon_0 \tau_a} s(T_{\text{inf}}) - \frac{1 - \varepsilon_0}{\varepsilon_0} s(T_u) - \frac{\varepsilon_a}{\varepsilon_0 \tau_a} s(T_a) \quad (8)$$

同理,当光路中存在粉尘干扰时,被测对象发出的红外辐射对应的探测器信号为:

$$s(T_0) = \frac{1}{\varepsilon_0 \tau_a \tau_d} s(T_{\text{inf}}) - \frac{1 - \varepsilon_0}{\varepsilon_0} s(T_u) -$$

$$\frac{1 - \tau_d - \rho_d}{\varepsilon_0 \tau_d} s(T_d) - \frac{\rho_d}{\varepsilon_0 \tau_d} s(T_u) - \frac{\varepsilon_a}{\varepsilon_0 \tau_a \tau_d} s(T_a) \quad (9)$$

当受光路中的粉尘干扰时,红外相机自身并不会考虑光路中粉尘干扰,本文记直接测量的带有误差的温度结果为  $T'_0$ , 可表示为:

$$s(T'_0) = \frac{1}{\varepsilon_0 \tau_a} s(T_{\text{inf}}) - \frac{1 - \varepsilon_0}{\varepsilon_0} s(T_u) - \frac{\varepsilon_a}{\varepsilon_0 \tau_a} s(T_a) \quad (10)$$

因此,在将式(9)、(10)联立后,可以得到粉尘影响下的红外测温结果与未受影响下的红外测温结果之间的关系:

$$s(T_0) = \frac{1}{\tau_d} s(T'_0) + \left(1 - \frac{1}{\tau_d} + \frac{1 - \tau_d - \rho_d}{\varepsilon_0 \tau_d}\right) s(T_u) - \frac{1 - \tau_d - \rho_d}{\varepsilon_0 \tau_d} s(T_d) \quad (11)$$

当假定相机的红外探测器的光谱响应率在红外波段范围内不随波长变化时,可通过对普朗克定律积分,得到红外探测器电压信号强度与被测物体表面温度之间的关系<sup>[24]</sup>。

$$s(T) = CT^n \quad (12)$$

式中:  $C$  和  $n$  是拟合系数,与红外相机的光圈和探测器类型相关。

将式(12)带入式(11),可以得到基于红外辐射测温机理的温度补偿模型。

$$T_0 = \tau_d^{-\frac{1}{n}} T'_0 \times$$

$$\left\{ 1 + \frac{[\tau_d - 1 + \varepsilon_0^{-1}(1 - \tau_d - \rho_d)] T_u^n - \varepsilon_0^{-1}(1 - \tau_d - \rho_d) T_d^n}{T_0^n} \right\}^{\frac{1}{n}} \quad (13)$$

式中:  $T_0$  和  $T'_0$  分别表示被测对象真实温度和粉尘干扰下带误差的实测温度。

理论上,如果能获取对红外测温过程造成干扰的粉尘透射率场精确分布,测得粉尘温度、环境温度,再结合式(13),就能对红外测温误差实现补偿。然而,真实粉尘干扰下的复杂空间中,粉尘的物性参数难以直接测定。为此,参考 Pan 等<sup>[25]</sup>的工作,对上述红外测温补偿模型进行简化,在环境温度和粉尘温度相等情况下,可以推断出,当现场条件满足  $T'_0/T_u \geq |100(1 - \tau_d)|^{1/n}$  时,待测物体表面温度真值与粉尘干扰下实测值间的关系可以近似表示为:

$$T_0 = \tau_d^{-\frac{1}{n}} T'_0 \quad (14)$$

进而,可以将粉尘造成的红外测温误差近似表示为:

$$\Delta T = T_0 - T'_0 = \left(\tau_d^{-\frac{1}{n}} - 1\right) T'_0 \quad (15)$$

### 2.2 粉尘透射率场计算模型

在实际工业现场,粉尘透射率场分布难以通过红外热图像或其他额外的测量仪器直接精确测量,而可见光

图像纹理细节丰富,为量化粉尘透射率提供图像基础。为此,利用可见光相机与红外热像仪构建跨谱立体视觉子系统,通过可见光图像获取可见光场景下的粉尘透射率场分布,然后再通过跨谱立体视觉中的外部参数映射到红外波段,最后,根据相同粉尘分布下可见光波段下粉尘透射率与红外波段下粉尘透射率的关系,获取红外图像中粉尘透射率场分布,如图 3 所示。

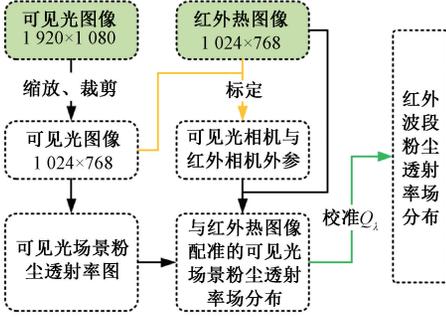


图 3 粉尘透射率场计算流程

Fig. 3 Schematic diagram of dust transmittance field calculation

由 Lambert-Beer 定律<sup>[26]</sup> 推导可知,光路中存在粉尘等干扰时,其透射率可以表示为:

$$\tau = e^{-kcl} \quad (16)$$

式中: $k$  为质量消光系数; $c$  为粉尘浓度; $l$  为粉尘的干扰作用距离。其中,质量消光系数与波长有关,是决定不同波段处透射率值的关键参数,但是在非专业实验环境下,该系数难以直接测定。

在相同的粉尘干扰下,对于红外热图像与可见光图像中的同一点,式(16)中的  $c$  和  $l$  均相等。根据 Lambert-Beer 定律,可见光图像中粉尘透射率与红外图像中粉尘透射率存在如下关系。

$$\frac{\ln \tau_{\text{inf}}(x)}{\ln \tau_{\text{vis}}(x)} = \frac{k_{\text{inf}}c(x)l(x)}{k_{\text{vis}}c(x)l(x)} = \frac{k_{\text{inf}}}{k_{\text{vis}}} \Rightarrow \tau_{\text{inf}} = \tau_{\text{vis}}^{k_{\text{inf}}/k_{\text{vis}}} \quad (17)$$

式中: $\tau_{\text{inf}}$  和  $\tau_{\text{vis}}$  分别表示红外图像和可见光图像中的粉尘透射率; $k_{\text{inf}}$  和  $k_{\text{vis}}$  分别表示红外波段下和可见光波段下的质量消光系数。

对于同一检测场景,红外图像和可见光图像受到同样分布粉尘的影响,因此,可以将  $k_{\text{inf}}/k_{\text{vis}}$  近似为一个常数  $Q_\lambda$ , 则红外测温补偿模型式(15)可以表示为:

$$\Delta T = T_0 - T'_0 = (\tau_{\text{vis}}^{-Q_\lambda/n} - 1) T'_0 \quad (18)$$

在图像去雾领域,常使用大气散射模型来描述有雾图像的形成机理,粉尘与水雾均为不同颗粒构成的粒子系,因此,本文采用大气散射模型来描述有粉尘干扰图像的形成机理。

$$I(x) = J(x)\tau(x) + A(1 - \tau(x)) \quad (19)$$

式中: $I$  为有粉尘图像; $J$  为无粉尘图像; $\tau$  为粉尘透射率; $A$  为大气光强; $x$  为图像像素位置。

受暗通道先验的启发<sup>[27]</sup>,式(19)可以表示为:

$$\min_{l \in \Omega(x)} (\min_{ch \in \{r,g,b\}} I^{\text{ch}}(l)) = \tau(x) \cdot \min_{l \in \Omega(x)} (\min_{ch \in \{r,g,b\}} J^{\text{ch}}(l)) + (1 - \tau(x))A \quad (20)$$

式中: $\Omega(x)$  为以  $x$  为中心的邻域, $ch$  为 RGB 通道。

对于无雾的场景,在任一像素点的邻域范围内,其暗通道强度为 0,即:

$$J^{\text{dark}}(x) = \min_{l \in \Omega(x)} (\min_{ch \in \{r,g,b\}} J^{\text{ch}}(l)) \approx 0 \quad (21)$$

其中, $J^{\text{dark}}$  为暗通道图像,将式(21)代入式(20)可得:

$$\tau(x) = 1 - \min_{l \in \Omega(x)} \left( \frac{\min_{ch \in \{r,g,b\}} I^{\text{ch}}(l)}{A^{\text{ch}}} \right) \quad (22)$$

根据式(22)可对可见光图像中的介质透射率进行估计。同时,考虑到暗通道先验中块状滤波窗口可能导致相邻块之间透射率信息的不连续,通过引导滤波对粉尘透射率进行优化处理。

随后,以可见光成像通道中的粉尘透射率为基础,利用成像系统中可见光相机与红外热像仪间的外部标定参数配准可见光图像和红外热图像。由于可见光图像与可见光场景粉尘透射率在像素点上一一对应,则当可见光图像与红外热图像配准后,可见光场景粉尘透射率在像素点上也与红外热图像一一对应。

式(17)刻画了红外图像中粉尘透射率与可见光图像中粉尘透射率间的关系。在确定可见光场景粉尘透射率后,为确定式(18)中的  $Q_\lambda$  值,设计黑体炉实验对式(18)中的  $Q_\lambda$  进行拟合,实现对红外波段粉尘透射率的校准。如图 4 所示,通过统计发现  $Q_\lambda$  值域落在(0.65,0.95)区间内,根据温度补偿效果,本文将其设为 0.8。

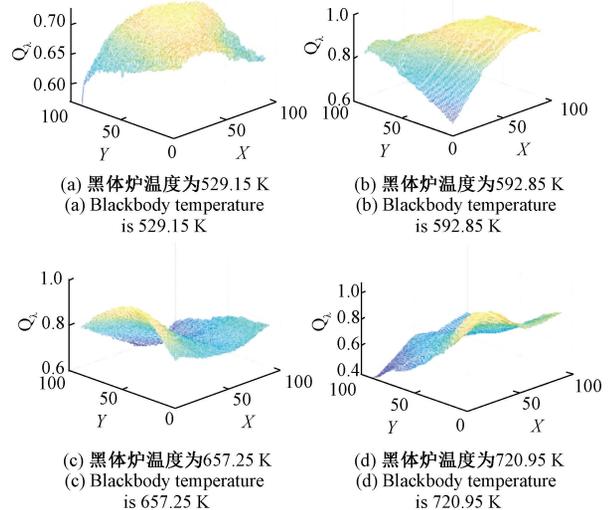


图 4 黑体区域  $Q_\lambda$  值分布情况

Fig. 4  $Q_\lambda$  distribution in blackbody region

根据建立的红外测温补偿模型和校准后的红外图像

中粉尘透射率,即可对粉尘干扰的红外测温误差进行补偿。

### 3 单视角下三维热成像方法

#### 3.1 单视角深度图修复

单视角成像时,受视野限制,前景物体遮挡其他区域的问题较为突出,导致单视角深度图存在遮挡空洞、噪声等问题。本文基于严格配准的可见光图像和深度图像,通过以下步骤对深度图中的空洞、噪声等问题进行修复。

1) 利用双边滤波算法消除深度图中噪声与孤立缺失点;

2) 针对深度相机中由于多路径干扰导致的边缘像素失效问题,利用分水岭算法将可见光灰度图像分割为多个区域,然后将可见光图像分割的边缘信息叠加到深度图中,达到在深度边缘特征缺失区域内将深度图分区的效果;

3) 利用 Criminisi 算法修复深度图空洞<sup>[28]</sup>。Criminisi 算法是一种基于样本块的图像修复算法,该算法结合了图像的几何信息与纹理生成方法,其主要思路是在图像缺失区域的边界上确定一个像素点及以其为中心的像素区块,然后从图像完整区域中根据像素块的自相似性找到与其相似度最高的样本块,再利用该样本块对缺失边缘像素块进行替代填充,在缺失边缘进行迭代,直至填充完所有缺失区域,从而实现图像修复。

图5显示了修复前后的单视角深度图。由图5可知,修复后深度图的噪声得到有效抑制,对空洞缺陷实现了填补,丰富了场景深度信息,为后续三维热成像方法中的虚拟视点绘制及三维热成像本身的深度完整性提供了基础。



图5 单视角深度图修复前后对比

Fig. 5 Comparison of single-view depth map before and after repair

#### 3.2 基于虚拟视点双向映射的三维热成像模型

##### 1) 虚拟视点双向映射过程

基于深度图的绘制技术 (depth image based rendering, DIBR) 在基于图像的虚拟视点绘制的基础上衍生出来,其原理是利用深度图中每个像素的深度信息,增加图像采样的信息量。本文提出基于虚拟视点映射的三维热成像方法,即利用这种虚拟视点选择和视图映射的

方式,将深度图所包含的深度信息与红外热图像包含的温度信息映射到同一视点下的同一成像平面,再将虚拟视点下的深度图转换为点云,并以温度为点云着色,实现三维热成像。

如图6所示,根据图像坐标系和世界坐标系的变换关系,记真实图像坐标系相机内参数为  $\mathbf{K}_r$ ,从真实图像坐标系到世界坐标系变换的旋转矩阵  $\mathbf{R}_{rw}$ ,平移向量  $\mathbf{T}_{rw}$ ,虚拟图像坐标系相机内参数为  $\mathbf{K}_v$ 。

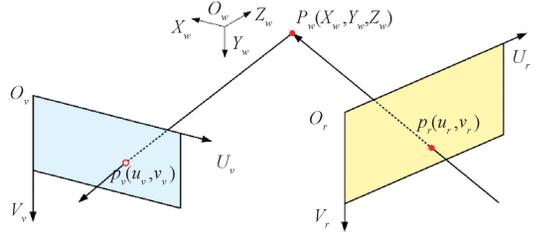


图6 DIBR 三维映射示意图

Fig. 6 Schematic diagram of 3D mapping in DIBR

同时,从真实视点下的深度图中获取像素点  $p_r(u_r, v_r)$  处的真实深度值  $z_{pr}$ ,则像素点  $p_r(u_r, v_r)$  映射到世界坐标系中的过程可表示为:

$$z_{pr} p_r = \mathbf{K}_r (\mathbf{R}_{rw} P_w + \mathbf{T}_{rw}) \quad (23)$$

对该式取逆运算,则可以得到参考点在世界坐标系中的坐标:

$$P_w = \mathbf{R}_{rw}^{-1} (z_{pr} \mathbf{K}_r^{-1} p_r - \mathbf{T}_{rw}) \quad (24)$$

类似地,从世界坐标系到虚拟图像坐标系映射时,参考点在世界坐标系中的坐标也可以表示为:

$$P_w = \mathbf{R}_{vw}^{-1} (z_{pv} \mathbf{K}_v^{-1} p_v - \mathbf{T}_{vw}) \quad (25)$$

式(24)和(25)表示同一个空间点,则将二式联立,可得:

$$P_v = \frac{1}{z_{pv}} \mathbf{K}_v ((\mathbf{R}_{vw} \mathbf{R}_{rw}^{-1} z_{pr} \mathbf{K}_r^{-1} p_r - \mathbf{T}_{rw}) + \mathbf{T}_{vw}) \quad (26)$$

式中:  $z_{pv}$  可根据本文建立的多源立体成像三维热成像系统中点的坐标进行求解。

要实现完整的深度与温度双向映射到最优虚拟视点  $VP_0$ ,需要分别将红外热像仪光心  $O_{inf}$ 、最优虚拟视点  $VP_0$  作为虚拟视点,执行3次上述过程,从而实现三维热成像。

##### 2) 最优视点获取

为了获取单视角成像下的最优视点,基于 DIBR 技术,利用固定安装位置下的真实视点图像生成最优虚拟视点,以获得单视角视觉检测条件下视觉信息更为丰富的三维热成像结果。在单视角条件下,当虚拟视点与真实视点的距离越远时,在视点转换过程中造成的裂纹与空洞影响越严重,后续填充的难度就越高。对于有两个原始真实视点的多源立体视觉三维重建系统而言,如果

设置的虚拟视点选择范围过大,由两个真实视点到虚拟视点生成的两种虚拟图像将存在过多的裂纹与空洞等问题。在硬件安装位置已经确定的情况下,通过软件优化单视角成像效果的操作空间是有限的,为了便于求解,有必要进一步缩小最优虚拟视点选择的范围。

如图 7 所示,本文将多源立体成像系统中的两个真实视点与最优虚拟视点的选择范围限定在视点平面  $S_v$  中两个真实视点  $VP_{lr}$  和  $VP_{rr}$  所在圆弧上,该圆弧的圆心为视场中心点  $P_c$ ,半径为深度相机视点(在图中用  $VP_{rr}$  表示)到  $P_c$  的距离  $d$ 。如此,当虚拟视点在圆弧上运动时,视场范围和三维点云表面曲率的变化很小,二者成为不显著的几何特征。因此,对于缩小选择范围后的虚拟视点优化问题,本文设计了以虚拟视点映射图像的空洞比例和图像信息熵为主要几何特征的视点评分函数  $F$ ,这样就把视点优化问题转化成对  $F$  求最大值。

$$F = H_T H_D / R_N \quad (27)$$

式中:  $H_T = - \sum_i \sum_j S(i,j) \log S(i,j)$  为红外热图像信息熵;  $H_D = - \sum_i P_i \log P_i$  为深度图一元信息熵;  $R_N = N_0 / HW$  为空洞像素数量所占图像总像素的比例。

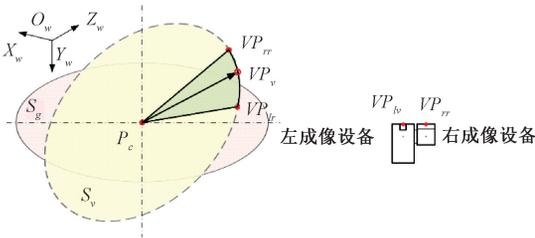


图 7 最优虚拟视点选择范围

Fig. 7 Optimal virtual viewpoint selection range

确定目标函数后,为了求解方便,可以将空间位置关系转到球坐标系中,利用粒子群优化算法求解。然后,再将最优视点位置转换到笛卡尔空间坐标系进行表达,即从深度相机视点转换到虚拟视点的旋转矩阵和平移向量和从红外热像仪视点转换到最优虚拟视点的旋转矩阵及平移向量。最后,将最优视点位置代入基于虚拟视点双向映射的三维热成像模型,得到最优视点下物体表面的三维热成像。

单视角三维热成像的整体流程如图 8 所示。

#### 4 实验验证

为了验证上述方法的可行性,本文设计了高炉料面模拟装置,模拟粉尘干扰下单视角三维热成像环境,开展粉尘干扰下单视角三维热成像实验。实验过程如图 9 所示。

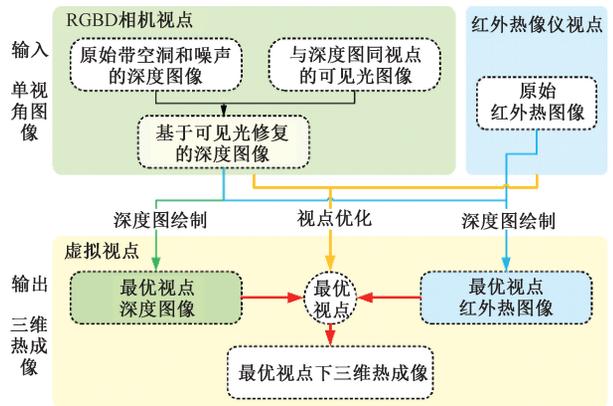


图 8 单视角三维热成像方法流程

Fig. 8 Schematic diagram of single-view three-dimension thermography



图 9 三维热成像系统组成

Fig. 9 Composition of the 3D thermography system

实验中,将模拟高炉料面的真实物料作为待测物体,主要包括焦炭、铁矿石等,这些物料无规则堆积在模拟高炉装置内。由于实验室安全环保等要求,难以直接在实验室环境内利用真实粉尘颗粒来模拟工业粉尘动态干扰的场景。考虑到悬浮在空中的粉尘和水雾是具有相似粒径的动态分布介质,当水雾或粉尘分布在红外热像仪和待测物体之间的光路时,均会吸收和散射待测物体发出的红外辐射,减少了被红外热像仪接收的部分辐射,对红外测温结果造成误差。因此,水雾和粉尘对红外测温干扰具有一定相似性,本文利用空气加湿器产生的水雾模拟粉尘干扰。此外,由于高炉炼铁过程极其复杂,难以在实验室环境内产生与真实炉顶料面一样的模拟料面,本文利用强光灯和白炽灯分别发出的强光与热量模拟料面的煤气流区域和高温环境。为获取同一粉尘分布的可见光与红外粉尘干扰图像,选择具有时间同步功能的红外热像仪,设备光心距离约为 5 cm,固定在模拟高炉料面的斜上方。对所有设备预热,在通电工作 30 min 后,检查白炽灯表面及其周围炉料温度是否稳定,然后以 5 s 为周

期开启和关闭空气加湿器,依次升高空气加湿器的挡位,同时采集不同水雾分布下的可见光与红外热图像。焦炭为不透明的黑色非金属物体,将红外热像仪的发射率设置为1,反射率为0。同时,为了对实验中温度补偿结果进行验证,在图像采集过程中,采集空气加湿器关闭状态下的料面热图像作为真值。

其中,对于真实温度的获取,首先以热电偶对红外热像仪温度进行校正,然后将校正后的红外热像仪测温结果视为真实温度。粉尘(水雾)温度与环境温度均为294.15 K,加热后的白炽灯表面温度为400 K~450 K,平均透射率约为0.91,取式(15)中 $n$ 值为4,满足 $T'_0/T_u \geq |100(1 - \tau_a)|^{1/n}$ 简化条件。

4.1 温度补偿效果分析

图10~12分别绘制了数据组1中补偿前后的红外测温曲线、绝对误差和相对误差,可以看出,经过本文方法补偿后,因粉尘(水雾)造成的测温误差被显著地降低。需要指出的是,从图中可知,也存在温度过度补偿的问题,不过这种情况较少,整体上来,经过补偿后,大部分测温误差是降低的。

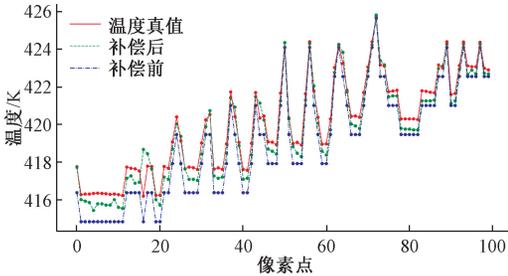


图10 数据组1中红外测温结果曲线(部分点)  
Fig. 10 Temperature measurement results in dataset 1 ( partial points )

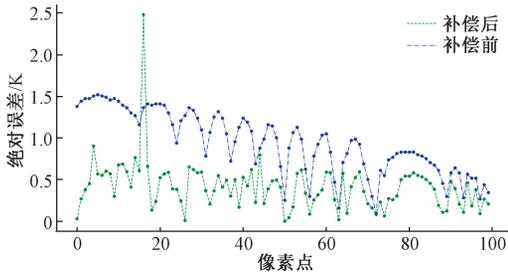


图11 数据组1中红外测温绝对误差(部分点)  
Fig. 11 Absolute error of infrared temperature measurement results in dataset 1 ( partial points )

此外,为了定量分析模拟高炉料面测温补偿实验的结果,用平均误差(mean absolute error, MAE)、平均平方误差(mean squared error, MSE)和均方根误差(root mean squared error, RMSE)评价补偿前后误差。

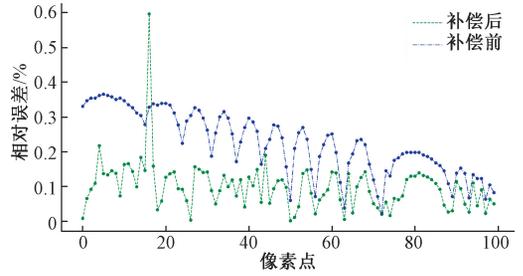


图12 数据组1红外测温相对误差(部分点)  
Fig. 12 Relative error of infrared temperature measurement results in dataset 1 ( partial points )

$$MAE = \frac{1}{N_m} \sum_{i=1}^{N_m} |T_i - T'_i| \tag{28}$$

$$MSE = \frac{1}{N_m} \sum_{i=1}^{N_m} (T_i - T'_i)^2 \tag{29}$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N_m} \sum_{i=1}^{N_m} (T_i - T'_i)^2} \tag{30}$$

式中: $T_i$ 和 $T'_i$ 分别表示被测对象的真实温度和实测温度; $N_m$ 表示测温总次数。

表2显示了计算得到的评价指标。在表2中, $MAE_{be}$ 、 $MSE_{be}$ 和 $RMSE_{be}$ 为补偿前的指标, $MAE_{af}$ 、 $MSE_{af}$ 和 $RMSE_{af}$ 为补偿后的指标。由表2可知,补偿后的 $MAE_{af}$ 、 $MSE_{af}$ 和 $RMSE_{af}$ 这3个指标显著降低,表明本文补偿方法能够有效地降低了粉尘造成的测温误差,对于克服粉尘干扰的作用显著。

表2 补偿前后的测温误差

Table 2 Temperature measurement errors before and after compensation

数据组	$MAE_{be}$	$MAE_{af}$	$MSE_{be}$	$MSE_{af}$	$RMSE_{be}$	$RMSE_{af}$
1	0.555 7	0.229 9	0.348 5	0.075 2	0.590 3	0.274 2
2	0.524 7	0.228 3	0.317 8	0.077 7	0.563 7	0.278 8
3	0.293 3	0.167 7	0.114 5	0.080 5	0.338 3	0.283 6

4.2 三维热成像效果分析

当前实验场景下的最优视点位置和原始红外热像仪与深度相机视点的关系如表3所示。

表3 最优视点和原始深度相机真实视点位置关系

Table 3 Relationship between the optimal viewpoint and the real viewpoint position of the original depth camera

旋转矩阵			平移向量		
0.997 8	0.063 4	0.059 8	[-60.251 4	2.560 0	-30.426 6]
-0.074 2	0.998 0	-0.003 5			
-0.068 3	0.000 9	0.996 9			

图 13 为不同映射方式得到的三维热成像效果对比,从中可以看出,在输入相同分辨率的温度与深度图后,采用单向映射造成的图像形变和缺失较大,在三维热成像中表现为缺失温度信息的点云,而本文双向映射的方式能够减少映射过程中造成的图像形变与数据损失,得到信息相对丰富的三维热成像结果。

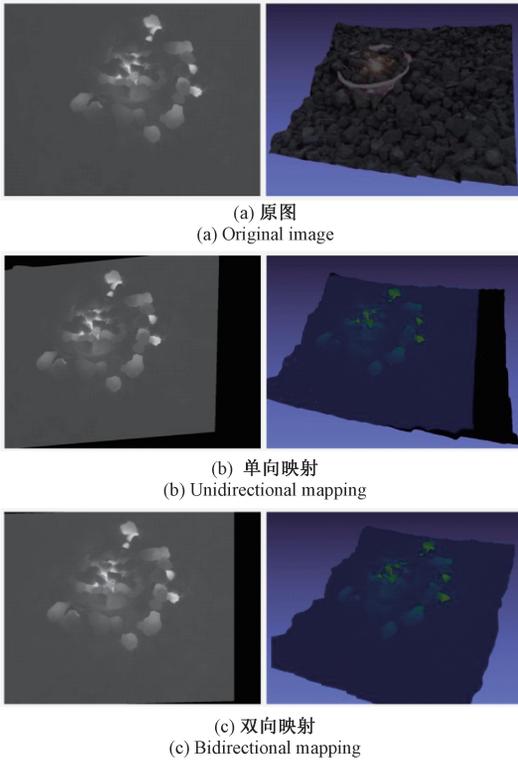


图 13 不同数据映射方式下红外热图像与三维热成像效果  
Fig. 13 Infrared thermal image and three-dimensional thermal imaging effects under different data mapping methods

以数据映射过程中的红外热图像为例,原始红外热图像分辨率为  $1\ 024 \times 768$ ,在完整的  $1\ 024 \times 768$  像素空间中占比为 100%,如表 4 所示,使用单向映射后,红外热图像发生了一定的变形,此时在  $1\ 024 \times 768$  像素空间中,有效温度数据占比下降到 69.86%,本文双向映射方法下,红外热图像仍保有 85.73% 的原始数据,说明在最终得到的三维热成像结果中,本文最优视点双向映射方法能够保留更多红外热像仪最初获取的温度信息,实现对有限的单视角成像数据的高效利用。

表 4 不同映射方式有效像素占比

Table 4 The proportion of effective pixels in different mapping methods

映射方式	零像素数量	有效数据占比/%
单向映射	177 752	69.86
最优视点双向映射	84 146	85.73

### 4.3 讨 论

本文提出的粉尘干扰下工业物料表面单视角三维热成像方法,能够有效实现受限空间粉尘干扰下物料表面三维热成像,保留更多温度和深度信息,同时能够克服粉尘对红外测温的影响,具有较高温度测量精度,对实际工业受限空间粉尘干扰场景的三维热成像具有重要指导意义。但在实际的工业应用中,还要特别注意选择参数尽可能相近的三维热成像设备,尽可能减少因图像缩放和裁剪造成的图像信息损失,进一步地,可以根据参数选择的需求,研发参数平衡的多源立体成像设备与系统。

### 5 结 论

本文构建了三维热成像多源立体成像系统,提出了粉尘干扰下工业物料表面单视角三维热成像方法。本文建立了基于虚拟成像的立体视觉联合外参标定模型,实现了红外热图像和可见光图像的空间同步。进一步,提出了粉尘干扰下红外测温补偿方法和粉尘透射率计算模型,获取了误差较小的目标场景温度分布。在此基础上,提出了基于深度图绘制和视点优化的三维热成像方法,将深度信息和温度信息在最优虚拟视点叠加,实现了最优视点下温度与形貌数据的融合。模拟高炉料面的三维热成像实验结果表明本文方法实现了粉尘干扰下物体表面单视角三维热成像,能够在单视角下保留更多温度和深度信息,减小了红外测温误差,对实际粉尘干扰场景下工业物料表面三维热成像具有重要参考价值。

### 参考文献

- [1] 苗亮亮,陈先中,侯庆文,等. 高炉料面传感器布置的混沌捕鱼策略[J]. 仪器仪表学报, 2014, 35(1): 132-139.  
MIAO L L, CHEN X ZH, HOU Q W, et al. Chaotic fishing strategy used in the sensor deployment of the burden surface in blast furnace[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2014, 35(1): 132-139.
- [2] 郑太雄,黄帅,李永福,等. 基于视觉的三维重建关键技术研究综述[J]. 自动化学报, 2020, 46(4): 631-652.  
ZHENG T X, HUANG SH, LI Y F, et al. Key techniques for vision based 3D reconstruction: A review[J]. Acta Automatica Sinica, 2020, 46(4): 631-652.
- [3] 朱代先,巩若琳,孔浩然,等. 基于注意力机制的多视图立体重建算法[J/OL]. 电子测量技术, 1-8[2024-10-22].  
ZHU D X, GONG R L, KONG H R, et al. Multi-view stereo reconstruction algorithm based on attention mechanism[J/OL]. Electronic Measurement Techno-

- logy, 1-8[2024-10-22].
- [4] 刘韵婷,高宇,戴佳霖,等.融合ECA注意力层和轻量正则化的多视图三维重建[J].电子测量与仪器学报,2024,38(7):179-186.  
LIU Y T, GAO Y, DAI J L, et al. Multi-view 3D reconstruction combining ECA attention layer and lightweight regularization [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2024, 38 (7): 179-186.
- [5] 潘冬,蒋朝辉,桂卫华.基于方向发射率校正的红外测温补偿方法[J].仪器仪表学报,2023,43(6):213-220.  
PAN D, JIANG ZH H, GUI W H. An infrared temperature compensation method based on directional emissivity correction [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2023, 43(6): 213-220.
- [6] 李泉成,曹江涛,姬晓飞.光流增强的红外成像气体泄漏检测方法[J].电子测量与仪器学报,2023,37(3):50-56.  
LI Q CH, CAO J T, JI X F. Infrared imaging gas leak detection method with optical flow enhancement [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2023,37(3):50-56.
- [7] 吴玉香,王超,冼颖宪.基于稀疏直接法和图优化的移动机器人SLAM[J].仪器仪表学报,2018,39(4):257-263.  
WU Y X, WANG CH, XIAN Y X. SLAM based on sparse direct method and graph optimization for mobile robot [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2018, 39(4): 257-263.
- [8] 孟明,杨方波,余青山,等.基于Kinect深度图像信息的人体运动检测[J].仪器仪表学报,2015,36(2):386-393.  
MENG M, YANG F B, SHE Q SH, et al. Human motion detection based on the depth image of Kinect [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2015, 36(2): 386-393.
- [9] 潘冬,蒋朝辉, MALDAGUE X, 等.基于可解耦三维热成像系统的高保真三维热成像方法[C].第33届中国过程控制会议论文集,2022,1:465.  
PAN D, JIANG ZH H, MALDAGUE X, et al. High-fidelity 3D thermal imaging method based on decoupled 3D thermal imaging system[C]. Proceedings of the 33rd China Conference on Process Control, 2022, 1: 465.
- [10] 许宝杯.基于深度相机的三维热成像重建技术研究[D].浙江大学,2019.  
XU B B. Research on 3D thermography reconstruction based on depth sensor[D]. ZheJiang University, 2019.
- [11] VIDAS S, MOGHADAM P. Heatwave: A handheld 3D thermography system for energy auditing[J]. Energy and Buildings, 2013, 66: 445-460.
- [12] LANDMANN M, HEIST S, DIETRICH P, et al. High-speed 3D thermography [J]. Optics and Lasers in Engineering, 2019, 121: 448-455.
- [13] CARDONE G, IANIRO A, DELLO IOIO G, et al. Temperature maps measurements on 3D surfaces with infrared thermography[J]. Experiments in Fluids, 2012, 52(2): 375-385.
- [14] ROBERTS I A, WANG CH J, ESTERLEIN R, et al. A three-dimensional finite element analysis of the temperature field during laser melting of metal powders in additive layer manufacturing[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2009, 49 (12/13): 916-923.
- [15] BARRY T, FULLER G, HAYATLEH K, et al. Self-calibrating infrared thermometer for low-temperature measurement[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2011, 60(6): 2047-2052.
- [16] 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.  
SHI D P, WU CH, LI Z J, et al. Analysis of the influence of infrared temperature measurement based on reflected temperature compensation and incidence temperature compensation [J]. Infrared and Laser Engineering, 2015, 44(8): 2321-2326.
- [17] 张志强,王萍,于旭东,等.高精度红外热成像测温技术研究[J].仪器仪表学报,2020,41(5):10-18.  
ZHANG ZH Q, WANG P, YU X D, et al. Study on high accuracy temperature measurement technology of infrared thermal imager [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2020,41(5):10-18.
- [18] DAI SH SH, YU L B, ZHANG X X, et al. Research on surface temperature compensation of rotary kiln based on inverse exponential model [J]. Infrared Physics & Technology, 2018, 88: 128-132.
- [19] ZHANG Y C, CHEN Y M, FU X B, et al. The research on the effect of atmospheric transmittance for the measuring accuracy of infrared thermal imager [J]. Infrared Physics & Technology, 2016, 77: 375-381.
- [20] PAN D, JIANG ZH H, CHEN ZH P, et al. Temperature measurement and compensation method of blast furnace molten iron based on infrared computer vision[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2019, 68(10): 3576-3588.
- [21] PAN D, JIANG ZH H, CHEN ZH P, et al.

- Compensation method for molten iron temperature measurement based on heterogeneous features of infrared thermal images [J]. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2020, 16(11): 7056-7066.
- [22] 张旭辉,沈奇峰,杨文娟,等. 基于三激光点标靶的掘进机机身视觉定位技术研究[J]. *电子测量与仪器学报*, 2022, 36(6): 178-186.
- ZHANG X H, SHEN Q F, YANG W J, et al. Research on visual positioning technology of roadheader body based on three laser point target [J]. *Journal of Electronic Measurement and Instrumentation*, 2022, 36(6): 178-186.
- [23] USAMENTIAGA R, VENEGAS P, GUEREDIAGA J, et al. Infrared thermography for temperature measurement and non-destructive testing[J]. *Sensors*, 2014, 14(7), 12305-12348.
- [24] ZHANG ZH M, TSAI B K, MACHIN G. Radiometric temperature measurements: I. fundamentals [M]. Academic Press, 2009.
- [25] PAN D, JIANG ZH H, GUI W H, et al. Compensation method for the influence of dust in optical path on infrared temperature measurement [J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2021, 70: 1000811.
- [26] MAYERHÖFER T G, PAHLOW S, POPP J. The bouguer-beer-lambert law: Shining light on the obscure[J]. *ChemPhysChem*, 2020, 21(18): 2029-2046.
- [27] HE K M, SUN J, TANG X OU. Single image haze removal using dark channel prior [C]. 2009 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition,

2009: 1956-1963.

- [28] CRIMINISI A, PEREZ P, TOYAMA K. Region filling and object removal by exemplar-based image inpainting[J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2004, 13(9): 1200-1212.

### 作者简介



E-mail: pandong@csu.edu.cn

**Pan Dong** received his B. Sc. degree in 2015 from Central South University, received his Ph. D. degree in 2021 from Central South University. Now he is an associate professor in Central South University. His main research interests include infrared thermography, vision-based measurement, image processing, and deep learning.



**李奕天**(通信作者), 2021 年于中南大学获得学士学位, 现于中南大学攻读博士学位, 主要研究方向为红外热成像, 三维重建, 图像处理。

E-mail: 214607002@csu.edu.cn

**Li Yitian** (Corresponding author) received the B. Sc. degree in Central South University 2021. He is currently pursuing the Ph. D. degree in Central South University. His main research interests include infrared thermography, three-dimensional reconstruction and image processing.