

基于多视角热像图序列的物体表面温度场重建

胡 斌 田 薇 张超岳 童 宇
西安应用光学研究所 陕西 西安 710065

摘 要: 本文通过阐述物体表面温度场重建的重要性, 介绍热成像原理及多视角热像图获取技术。分析影响温度场重建效果的因素, 如热像图质量和视角相关因素, 提出基于多视角热像图序列的重建方法。该方法通过同步采集多视角热像图、处理可见光图像、结合深度数据与热像图温度信息以及多视角图像数据的对齐与融合等步骤, 实现了物体表面温度场的全面重建, 该方法在多个领域具有广泛应用价值, 包括工业生产、科研探索、环境监测、建筑节能和医疗诊断等。

关键词: 多视角热像图序列; 物体表面; 温度场重建; 热成像技术

1 物体表面温度场重建的重要性

物体表面温度场重建的重要性不言而喻, 它在多个领域都发挥着至关重要的作用。第一, 在工业生产中, 物体表面的温度分布是评估产品质量、监测生产过程和预防安全事故的关键指标。通过对物体表面温度场的精确重建, 可以及时发现生产过程中的热异常, 如过热、冷却不均等问题, 从而采取措施避免产品质量下降或生产事故的发生。第二, 在科研领域, 物体表面温度场的研究对于揭示物理现象、验证理论模型和探索新材料具有重要意义。例如, 在材料科学中, 了解材料表面的温度分布有助于评估其热稳定性和热导率, 为材料的研发和应用提供重要依据。第三, 在环境监测、建筑节能、医疗诊断等领域, 物体表面温度场重建也具有广泛的应用价值。在环境监测中, 通过重建地表温度场, 可以评估城市热岛效应、预测气候变化趋势。在建筑节能方面, 精确的温度场重建有助于优化建筑设计和运行策略, 提高能源利用效率^[1]。第四, 在医疗诊断中, 通过测量人体表面温度分布, 可以发现潜在的健康问题, 如血液循环异常、炎症等。物体表面温度场重建不仅对于工业生产、科研探索具有重要意义, 还广泛应用于环境监测、建筑节能、医疗诊断等多个领域。

2 热成像原理及多视角热像图获取相关技术

2.1 热成像基本原理

红外辐射的产生与物体温度密切相关, 根据普朗克辐射定律, 任何温度高于绝对零度的物体都会自发地以电磁波的形式发射红外辐射。物体表面的温度越高, 其辐射出的红外能量越强, 且辐射的峰值波长向短波方向移动(即维恩位移定律)。热像仪正是基于这一原理, 利用红外探测器捕捉物体发出的红外辐射, 将其转换成电信号, 并通过信号处理电路进行放大、滤波及模数转

换, 最终生成可见的热图像。这个过程中, 探测器阵列上的每个像素都对应着物体表面的一个微小区域, 通过测量这些区域的红外辐射强度, 即可获得整个物体表面的温度分布信息。

2.2 多视角热像图获取技术

在仪器选型上, 应优先选择具有高灵敏度、高分辨率以及宽温度测量范围的热像仪, 以确保采集到的热图像质量。安装布局时, 需确保各热像仪的视角互不重叠, 且能覆盖目标物体的所有关键区域。为实现同步采集, 可采用外部触发信号或通过网络协议实现各热像仪之间的时间同步, 确保同一时刻不同视角的热像图能够对应同一物理状态^[2]。在采集过程中, 还需根据实际需求设置合适的参数, 如分辨率(一般设置为探测器阵列的最大分辨率以保证细节信息不丢失)、帧率(根据物体温度变化速度和数据采集需求选择)以及温度范围(根据目标物体的最高和最低预期温度设置, 以确保测量精度)。

2.3 多视角热像图的特点与数据格式

不同视角下, 由于光照条件、物体表面几何形状及反射特性的影响, 同一物体表面的温度分布可能呈现出不同的特征。这些差异为后续的温度场重建提供了丰富的信息源。在数据格式方面, 常见的热像图数据格式包括原始辐射数据格式(如.raw)、标准图像格式(如.bmp、.jpeg)、以及专用的热成像数据格式(如.flir、.pngw等)。其中, 原始辐射数据格式保留了探测器接收到的原始红外辐射信息, 适用于高精度的温度计算和校正; 而标准图像格式则便于在普通图像处理软件中进行处理和可视化; 专用的热成像数据格式则结合了前两者的优点, 既保留了原始数据, 又提供了方便的数据访问和处理接口。在后续处理中, 应根据具体需求选择合适的数据格式, 以确保处理效率和准确性。

3 影响温度场重建效果的因素分析

3.1 热像图质量因素

热像图的分辨率决定了能够捕捉到的物体表面温度细节的程度，高分辨率的热像图能够提供更精细的温度分布信息，有利于重建出更准确的温度场模型。对比度则影响热像图中温度差异的可视化程度，高对比度的热像图能够更清晰地展示物体表面的温度梯度，从而有助于温度场重建的精确性。噪声水平是另一个重要的质量因素，过高的噪声会掩盖真实的温度信息，导致重建结果的不准确。为了优化热像图质量，进而提高温度场重建效果，可以从采集参数和图像后处理技术两方面入手。在采集参数方面，应选择合适的热像仪和配置适当的参数，如调整热像仪的灵敏度、滤光片以及曝光时间等，以获取高质量的热像图。在图像后处理技术方面，可以采用图像增强、去噪以及图像配准等技术来提高热像图的对比度和分辨率，从而减少噪声和干扰，提升温度场重建的准确性^[3]。

3.2 视角相关因素

热像仪视角数量决定了能够从多少个不同方向获取物体表面的温度信息，多个视角的采集可以提供更全面的温度分布信息，有助于重建出更完整的温度场模型。视角分布的均匀性则影响温度信息的覆盖范围和均匀性。如果视角分布不均匀，可能会导致某些区域的温度信息缺失或重复采集，从而影响重建结果的准确性。采集视角与物体表面的相对位置关系也会影响温度场重建的效果。如果视角与物体表面之间存在较大的夹角或遮挡，可能会导致温度信息的失真或丢失。为了合理配置热像仪视角以获得最佳的温度场重建效果，需要综合考虑目标物体的形状、尺寸以及表面特性等因素。一般来说，对于形状复杂或表面不平整的物体，需要采用更多的视角进行采集，以确保能够捕捉到所有关键区域的温度信息。另外，还要根据物体表面的几何形状和反射特性等因素，调整热像仪的采集角度和位置，以获得最佳的采集效果。

4 基于多视角热像图序列的物体表面温度场重建方法

4.1 方法的基本思路与流程

基于多视角热像图序列的物体表面温度场重建方法，旨在通过整合从不同视角获取的物体表面温度信息，重建出物体表面的完整温度场。该方法的基本思路在于，利用多视角成像技术，获取目标物体在多个视角下的热像图序列，随后通过图像处理和计算机视觉技术，提取每个视角下的温度信息，并借助三维重建技术，将这些温度信息融合成一个统一的三维温度场模

型。具体流程如下：首先，利用多台热像仪同步采集目标物体的多视角热像图序列，确保各视角下的热像图能够覆盖目标物体的所有关键区域；其次，对采集到的热像图进行预处理，包括去噪、增强对比度等，以提高后续处理的准确性；利用语义分割算法对可见光图像进行处理，提取目标物体的轮廓信息，为后续的温度点云融合提供几何约束；然后，将深度数据与热像图的温度信息相结合，生成每个视角下的温度点云，并进行初步处理，如去冗余点、平滑处理等；最后，利用多视角图像数据对齐与融合技术，将各个视角下的温度点云拼接成一个完整的三维温度场模型。

4.2 可见光图像的处理

通过处理可见光图像，可以提取目标物体的轮廓信息，为后续的温度点云融合提供几何约束。在处理可见光图像时，主要采用语义分割算法。语义分割算法是一种像素级别的图像分类技术，能够将图像中的每个像素都分类为某个特定的语义类别。在可见光图像处理中，可以选择合适的语义分割算法（如深度卷积神经网络、条件随机场等），对图像进行训练和优化，使其能够准确识别出目标物体的轮廓。通过语义分割算法，可以将目标物体从背景中分离出来，提取出物体的轮廓信息。这些信息将用于后续的温度点云融合步骤中，以确保温度信息的准确性和一致性。在提取目标物体轮廓后，还需要对轮廓进行进一步的处理和优化。例如，可以利用形态学操作（如膨胀、腐蚀、开运算、闭运算等）对轮廓进行平滑处理，去除轮廓上的噪声和毛刺^[4]。同时，还可以利用轮廓拟合算法（如最小二乘法、霍夫变换等）对轮廓进行精确拟合，以获得更加准确的物体轮廓信息。

4.3 深度数据与热像图温度信息的结合

深度数据与热像图温度信息的结合是温度场重建过程中的关键环节，深度数据提供了物体表面的三维几何信息，而热像图则提供了物体表面的温度信息。将两者结合起来，可以生成每个视角下的温度点云，为后续的多视角温度点云拼接提供基础数据。在结合深度数据与热像图温度信息时，首先需要深度数据进行预处理。这包括去除深度数据中的噪声、填补深度空洞以及平滑深度表面等步骤。预处理后的深度数据将用于生成物体表面的三维点云模型；将热像图的温度信息映射到三维点云模型上。这通常涉及到图像配准技术，即将热像图与深度图像进行对齐，以确保温度信息与三维几何信息的一致性。在配准过程中，可以利用特征点匹配、ICP算法等方法来实现图像的对齐。一旦对齐完成，就可以将热像图中的温度值赋予对应的三维点云上的点，从而

生成温度点云；生成的温度点云还需要进行初步处理。这包括去除冗余点（即那些由于噪声或误匹配而产生的点）、平滑处理（以减少点云中的波动和不平滑现象）以及去除离群点（即那些与其他点明显偏离的点）等步骤。初步处理后的温度点云将用于后续的多视角温度点云拼接过程中。

4.4 多视角图像数据的对齐与融合

通过将各个视角下的温度点云拼接成一个完整的三维温度场模型，可以实现对物体表面温度场的全面重建。在对齐多视角图像数据时，主要采用的是图像配准技术。这包括特征点匹配、ICP算法（迭代最近点算法）、以及全局优化算法等。特征点匹配是一种常用的图像配准方法，它通过提取图像中的特征点（如角点、边缘点等），并利用这些特征点之间的相似性来实现图像的对齐。ICP算法则是一种迭代最近点算法，它通过不断迭代调整两个点云之间的变换关系，使得两个点云之间的误差最小。全局优化算法则可以利用更多的全局信息来优化对齐结果，提高对齐的准确性和鲁棒性。在对齐过程中，需要注意的是，由于各个视角下的图像可能存在视角差异、光照变化以及噪声等因素，因此需要对齐算法具有一定的鲁棒性和适应性^[5]。为了解决这个问题，可以采用一些预处理技术来提高对齐算法的性能。例如，可以利用图像滤波技术来去除噪声和干扰，提高特征点的提取精度；可以利用图像增强技术来改善光照条件，提高图像的对比度和清晰度；一旦对齐完成，就可以进行多视角温度点云的融合。融合的过程通常涉及到点云的合并、去重以及平滑等步骤，在合并点云时，需要将不同视角下的点云按照对齐后的位置关系进行合并，生成一个完整的三维温度场模型，在去重步骤中，

需要去除由于对齐误差或重复采集而产生的冗余点。这可以通过比较点之间的距离和法线等几何信息来实现。最后，在平滑步骤中，需要对合并后的点云进行平滑处理，以减少点云中的噪声和不平滑现象。这可以通过利用移动最小二乘法、拉普拉斯平滑等方法来实现。

结束语

本文通过对多视角热像图序列的物体表面温度场重建方法进行深入研究，为相关领域提供了实用的技术支持。随着热成像技术的不断发展和应用领域的不断拓展，物体表面温度场重建方法的需求也日益增加。将继续完善和优化该方法，并探索其在更多领域的应用可能性，为推动相关领域的科技进步做出更大的贡献。

参考文献

- [1]毕淳锴,张远辉,付铎.基于多视角热像图序列的物体表面温度场重建[J].计量学报,2024,45(7):997-1006. DOI:10.3969/j.issn.1000-1158.2024.07.09.
- [2]张远辉,许璐钧,徐栢锐,等.基于事件相机的人体动作识别方法[J].计量学报,2022,43(5):583-589. DOI:10.3969/j.issn.1000-1158.2022.05.04.
- [3]张远辉,段承杰,朱俊江,等.眼球光心标定与距离修正的3维注视点估计[J].中国图象图形学报,2019,24(8):1369-1380.
- [4]邵剑浩,张远辉,陈科峰,等.基于3D毫米波雷达与相机的改进联合标定方法[J].计量学报,2024,45(5):631-638. DOI:10.3969/j.issn.1000-1158.2024.05.04.
- [5]许璐钧,张远辉,徐栢锐,等.地址事件数据流的快速车道线识别方法[J].计算机仿真,2022,39(10):153-158. DOI:10.3969/j.issn.1006-9348.2022.10.029.