



基于红外成像的FDM打印轨迹测量及质量评价方法

张月桐 陈文亮 王向军 刘峰 王美怡

FDM printing trajectory measurement and quality evaluation method based on infrared imaging

ZHANG Yuetong, CHEN Wenliang, WANG Xiangjun, LIU Feng, WANG Meiyi

引用本文:

张月桐, 陈文亮, 王向军, 等. 基于红外成像的FDM打印轨迹测量及质量评价方法[J]. 应用光学, 2024, 45(5): 1008–1018. DOI: 10.5768/JAO202445.0503003
ZHANG Yuetong, CHEN Wenliang, WANG Xiangjun, et al. FDM printing trajectory measurement and quality evaluation method based on infrared imaging[J]. *Journal of Applied Optics*, 2024, 45(5): 1008–1018. DOI: 10.5768/JAO202445.0503003

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.5768/JAO202445.0503003>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

[基于识别距离的红外成像仿真验证方法](#)

Validation method of infrared imaging simulation based on recognition range

应用光学. 2022, 43(4): 719–725 <https://doi.org/10.5768/JAO202243.0404001>

[基于低空视觉的直升机旋翼轴心轨迹测量法](#)

Helicopter rotor axial center trajectory measurement method based on low-altitude vision

应用光学. 2024, 45(4): 774–780 <https://doi.org/10.5768/JAO202445.0403002>

[基于针孔成像像面参数提取的单板机镜头显微成像质量评价方法](#)

Method of microscopic imaging quality evaluation for board lens based on image parameter extraction of pinhole imaging

应用光学. 2021, 42(5): 839–847 <https://doi.org/10.5768/JAO202142.0502003>

[单目视觉融合激光投射的无人机障碍探测方法](#)

Obstacles detection method for UAV based on monocular vision and laser projection

应用光学. 2023, 44(1): 202–210 <https://doi.org/10.5768/JAO202344.0107002>

[机器视觉螺纹图像评价方法](#)

Thread image evaluation method based on machine vision

应用光学. 2022, 43(5): 904–912 <https://doi.org/10.5768/JAO202243.0502004>

[基于谱分析的红外成像模糊去除算法研究](#)

Research on infrared imaging deblurring algorithm based on spectrum analysis

应用光学. 2024, 45(4): 751–758 <https://doi.org/10.5768/JAO202445.0402004>



关注微信公众号，获得更多资讯信息

文章编号:1002-2082 (2024) 05-1008-11

基于红外成像的 FDM 打印轨迹测量及质量评价方法

张月桐^{1,2}, 陈文亮^{1,2}, 王向军^{1,2}, 刘 峰^{1,2}, 王美怡^{1,2}

(1. 天津大学 精密测试技术及仪器国家重点实验室, 天津 300072;

2. 天津大学 微光机电系统技术教育部重点实验室, 天津 300072)

摘要: 熔融沉积型 (fused deposition modeling, FDM) 增材制造是一个热加工过程, 打印温度与运行精度的研究是 2 个相对独立的方向, 红外成像中高温熔丝的形状信息通常得不到有效的利用, 无法在温度监控的同时对打印设备的实时运行状态进行检测。提出了一种基于红外成像的 FDM 打印轨迹测量及质量评价方法, 采用红外相机对 FDM 打印机的热加工过程进行连续测量, 通过建立打印机系统坐标系与相机世界坐标系的位姿解算模型, 以及动态帧间红外特征匹配的全局相机运动位姿解算模型, 实现了对末端喷嘴运行位姿的实时测量, 得到了精确的打印轨迹信息。在此基础上, 建立了空间打印轨迹与红外图像中高温熔丝间的物像映射关系, 并在图像域对打印过程中的典型缺陷进行了质量评价, 其中图像处理平均耗时为 25.9 ms, 红外相机位姿测量的重投影误差为 0.7 像素, 正常打印状态下, 系统计算得到的理想打印轨迹与红外图像内高温区域的平均交并比为 0.61。实验结果表明, 该方法能够对打印过程中出现的模型错位、出料异常等典型问题进行准确识别, 为打印质量在线评价的相关研究提供了一种新的解决途径。

关键词: 增材制造; 红外成像; 单目视觉; 轨迹测量; 质量评价

中图分类号: TN214

文献标志码: A

DOI: [10.5768/JAO202445.0503003](https://doi.org/10.5768/JAO202445.0503003)

FDM printing trajectory measurement and quality evaluation method based on infrared imaging

ZHANG Yuetong^{1,2}, CHEN Wenliang^{1,2}, WANG Xiangjun^{1,2}, LIU Feng^{1,2}, WANG Meiyi^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Precision Measuring Technology and Instruments, Tianjin University, Tianjin 300072, China; 2. MOEMS Education Ministry Key Laboratory, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: Fused deposition modeling (FDM) is a hot working process, the research on temperature and motion accuracy in the printing process are independent directions, and the shape of the high temperature filament in the infrared image is usually not concerned, making it impossible to detect the operating status and temperature of the printer at the same time. An FDM printing trajectory measurement and quality evaluation method based on infrared imaging was proposed. The method adopted infrared camera to continuously monitor the FDM printing process, and established the pose solution model of the printer coordinate system and the camera world coordinate system, as well as the global camera motion pose solution model matching the infrared features between dynamic frames. The real time measurement of the running position of the end nozzle was realized, and the accurate print trajectory information was obtained. On this basis, the object image mapping relationship between the spatial print trajectory and the high temperature filament in the infrared image was established, and the quality of the printing process and typical defects were evaluated in the image domain. The average

收稿日期:2023-08-07; 修回日期:2023-09-25

基金项目:国家自然基金 (51575388)

作者简介:张月桐 (1996—), 男, 硕士研究生, 主要从事图像处理及应用研究。E-mail: 2020202301@tju.edu.cn

通信作者:刘峰 (1978—), 男, 博士, 主要从事光电传感与视觉检测研究。E-mail: tjliufeng@tju.edu.cn

time of image processing was 25.9 ms, and the reprojection error of infrared camera posture measurement was 0.7 pixel. Under normal printing conditions, the average IoU between the ideal print trajectory calculated by the system and the high temperature region in the infrared image is 0.61. The experimental results show that the proposed method can accurately identify the typical problems such as model dislocation and abnormal extruding in the printing process, which provides a new solution for the related research of online print quality evaluation.

Key words: additive manufacturing; infrared imaging; monocular vision; trajectory measurement; quality evaluation

引言

熔融沉积型(fused deposition modeling, FDM)是一种利用材料自身热塑性实现的增材制造技术,打印成品质量受到机械传动结构、温度控制等多种因素的影响^[1],依靠传统的传感器系统难以实现对打印过程的全面监控,针对打印过程中的异常检测是国内外3D打印工作者研究的重点。

设备运行的精度与稳定性是影响FDM打印质量的重要因素,可见光视觉被广泛应用于打印在线检测中。2019年,CHEN W J^[2]等人在打印过程中采集模型上表面的正投影,对打印精度进行逐层分析。2020年,BECKER P^[3]等人通过顶层模型与工作设备的轮廓信息,实现了对喷头运行状态的实时检测。同年,KOPSACHEILIS C^[4]等人使用主动扫描的方式对打印模型进行三维重建。2022年,RACHMAWATI S M^[5]等人将基于深度学习的表面缺陷检测应用于打印的在线检测中。这些方法对设备异常运行造成的缺陷有较好的检测效果,但对材料的热成型特性不敏感。打印温度与冷却速率也是影响热塑性材料塑形效果的另一重要因素^[6-7]。设备喷嘴(Nozzle)等加热元件的温度控制通常依靠热敏元件实现^[8]。2019年,WANG F F^[9]等人将红外成像应用于大规模熔丝制造(large scale additive manufacturing, LSAM)的表面温度监控中。2020年,POOLADVAND K^[10]等人对打印过程中ABS材料表面的红外发射率进行了深入研究。打印温度与运行精度是2个相对独立的研究方向,红外成像作为一种温度检测方式,热像中高温熔丝的形状信息通常得不到有效的利用,在温度监控的同时对打印运行状态进行检测的相关研究仍有待进一步拓展。

本文提出了一种基于红外成像的FDM打印轨迹测量及质量评价方法。方法首先在空间域实现了对打印轨迹的实时测量,又映射到图像域实现了对高温熔丝成型质量的在线质量评价,为FDM

打印过程的在线检测提供了一种新的解决途径。

1 打印轨迹检测系统

本文中红外相机对3D打印模型的高温区域进行观测的同时,对打印喷嘴结构进行空间定位。本节对打印机工作原理、依据硬件尺度建立的打印机坐标系以及测量系统内各坐标之间的转换关系进行了介绍。

1.1 系统结构

笛卡尔式FDM打印机的结构如图1所示。该类型打印机使用3组呈正交关系的主轴,带动喷头与打印平台进行3个自由度的空间平移运动,喷嘴以恒定的速率挤出高温熔丝,在平行于打印平台的模型上表面进行打印。这一结构中,喷嘴必须足够靠近打印平面,以保证熔融软化后的材料形状得到良好的控制,为FDM打印相关的视觉检测增加了诸多限制。

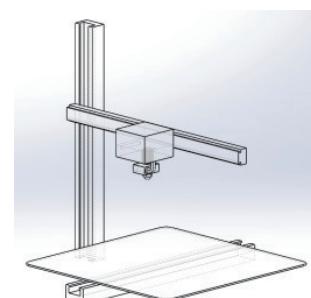


图1 笛卡尔打印机结构

Fig. 1 Structure diagram of Cartesian 3D printer

本文按照图2所示的方式搭建轨迹检测系统,红外相机以一定的夹角与打印机构进行同步运动,打印轨迹所在的平面与相机视场的夹角相对固定。红外图像中打印轨迹不会受到喷嘴之外其他结构的遮挡。在打印平台上安装参考平面,建立相机位姿计算使用的世界坐标系(world coordinate system, WCS) O_W 。

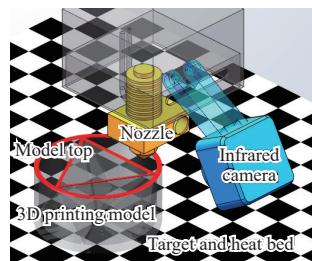


图 2 相机安装示意图

Fig. 2 Schematic diagram of camera installation

打印过程中,喷嘴中心的移动以绝对坐标的形式被储存在打印工程(Gcode)文件中,系统以打印设备的硬件尺度为基准,按照3个传动轴的正方向建立打印机坐标系(gcode coordinate system, GCS) O_G ,模型打印过程中的尺寸、速度等参数统一于打印机坐标系内。

由于打印平台上参考平面的安装角度与尺度差异,WCS与GCS之间存在着一个相似变换关系,相机与喷嘴、世界坐标系与打印机坐标系的关系如图3所示。

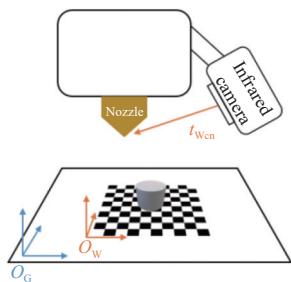


图 3 坐标转换示意图

Fig. 3 Schematic diagram of coordinate transformation

相机位姿经过图4的换算过程,得到打印系统定位信息,红外图像计算得到相机模型在世界坐标系(WCS)中的坐标 P_{Wc} ;系统中相机与喷头的相对位姿固定,相机模型中心平移后得到喷嘴在世界坐标系内的坐标 P_{Wn} ;经过相似变换,喷嘴中心坐标转换为GCS内的坐标 P_{Gn} 。

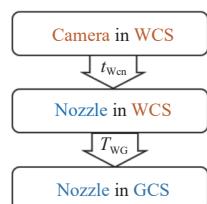


图 4 坐标转换流程图

Fig. 4 Flow chart of coordinate transformation

1.2 红外相机内参标定

以针孔相机光学中心为原点建立相机坐标系(camera coordinate system, CCS) O_c ,空间中任意点 $P_c = (X_c, Y_c, Z_c)^T$ 经过透视投影后失去深度信息,经过成像传感器平面的转化后,成为相机输出图像中显示坐标 $p_c = (u, v)$ 的二维点:

$$Z_c \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_x & 0 & u_0 & 0 \\ 0 & f_y & v_0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_c \\ Y_c \\ Z_c \\ 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中: f_x 、 f_y 表示相机 x 、 y 轴的归一化焦距; u_0 、 v_0 表示光学中心点的像素坐标。另外相机成像效果受到透镜畸变的影响,其中对画面影响最显著的径向畸变和切向畸变系数被记作 k_1 、 k_2 、 k_3 和 p_1 、 p_2 。用 (u, v) 表示成像平面上一点在无畸变的情况下像素坐标,用 (\hat{u}, \hat{v}) 表示该点经过镜头畸变后的坐标, $r = \sqrt{u^2 + v^2}$ 为该点到图像光学中心的像素距离,镜头畸变对图像坐标的影响如式(2)、式(3)所示。

$$\hat{u} = u(1 + k_1 r^2 + k_2 r^4 + k_3 r^6) + (2p_1 v + p_2(r^2 + 2u^2)) \quad (2)$$

$$\hat{v} = v(1 + k_1 r^2 + k_2 r^4 + k_3 r^6) + (p_1(r^2 + 2v^2) + 2p_2 u) \quad (3)$$

本文利用张氏标定法^[11]完成了上述红外相机的内参标定。实验中,红外靶标需要满足靶面平整度高、高低辐射区分界线清晰、靶面几何特征精度高等条件。本文针对性地设计了透射外部红外热源靶标^[12],靶标由红外热源和遮光片构成。其中FDM打印机的工作平台本身是一个具备加热功能的热床,且自身具有较高的平面度,以此作为红外靶标的热源。遮光片基底具有较高的红外辐射透过率,上表面使用遮光材料印刷棋盘格,将遮光片固定在打印平台上,形成图5中的红外标定靶标,其平面度和几何精度符合要求。红外相机拍摄靶标的效果如图6所示,达到了较好的成像效果。

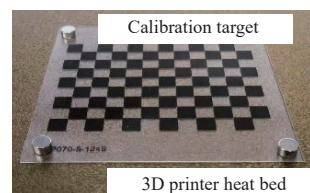


图 5 红外靶标实物图

Fig. 5 Infrared calibration target

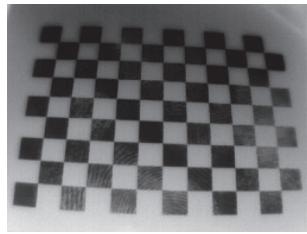


图 6 靶标红外图像

Fig. 6 Target in infrared image

1.3 相机位姿计算

视觉定位中, 相机模型被视作世界坐标系中旋转平移, 而尺度不变的刚体, 世界坐标系 O_w 内一点 $\mathbf{P}_w = (X_w, Y_w, Z_w)^T$ 经过欧氏变换得到其在相机坐标系 O_c 内的坐标 $\mathbf{P}_c = (X_c, Y_c, Z_c)^T$ 。变换矩阵 \mathbf{T} 由 3×3 的旋转矩阵 \mathbf{R} 和三维平移向量 \mathbf{t} 构成, 该矩阵描述了相机在世界坐标系中的位姿:

$$\begin{bmatrix} X_c \\ Y_c \\ Z_c \\ 1 \end{bmatrix} = \mathbf{T} \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{R} & \mathbf{t} \\ 0^T & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \\ 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

世界坐标系中的一点 $\mathbf{P}_w = (X_w, Y_w, Z_w)^T$ 经过欧式变换、透视投影、仿射变换后成为相机输出的二维图像画面中像素坐标为 $p_c = (u, v)$ 的点:

$$s \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} t_1 & t_2 & t_3 & t_4 \\ t_5 & t_6 & t_7 & t_8 \\ t_9 & t_{10} & t_{11} & t_{12} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \\ 1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

t_i 矩阵是相机内参与外参矩阵的积, 在相机内参与畸变系数已知的情况下, 通过图像中 n 个 2D-3D 匹配点对, 求解相机在世界坐标系中的位姿的方法被称为多点透视成像 (perspective-n-point, PnP)。

平面姿态估计是 PnP 问题中参考点共面的特殊情况, 在本文中空间位姿的计算主要依靠参考平面进行, 空间平面的单应性为位姿解算提供了更多的约束关系, 位姿恢复过程中的噪声能够更好地被剔除。2014 年, COLLINS T^[13] 等人提出了基于无穷小平面的姿态估计 (infinitesimal plane-based pose estimation, IPPE) 这一算法适用于透视、弱透视和准透视相机, 通过 4 组或更多 2D-3D 点对, 找到图像中空间平面姿态的最准确结果, 在平面位姿估计问题中, IPPE 运算速度与准确性优于传统 PnP 算法。

1.4 打印机与红外相机位姿解算

1) 系统中红外相机与喷嘴中心的相对位姿保持稳定, 通过如下方式对两者相对位姿进行测定。

将打印机喷头高度归零, 红外图像中喷嘴中心

点 $p_n = (u_n, v_n)^T$ 对应 WCS 内高度为 0 的空间点 $P_{wn} = (X_{wn}, Y_{wn}, 0)^T$, 像素坐标 p_n 由 CCS 内的直线 $P_{cn} = s \times (u_{n1}, v_{n1}, 1)^T$ 上的任意点投影得到。通过当前图像对应的世界坐标系内的相机位姿 R_{wc} 、 t_{wc} , 得到相机坐标系到世界坐标系的逆变换矩阵 T_{cw} , 通过式(6)计算喷嘴中心在相机坐标系内的空间深度 s 及其在参考系下的坐标 P_{wn} :

$$\begin{bmatrix} X_{wn} \\ Y_{wn} \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} = T_{cw} \begin{bmatrix} s \times u_{n1} \\ s \times v_{n1} \\ s \\ 1 \end{bmatrix} \quad (6)$$

在打印平台上多次测量, 得到系统中相机的初始安装角度 R_{wco} 以及喷嘴中心到相机模型中心的平移向量 t_{wcn} :

$$\mathbf{P}_{wn} = \mathbf{P}_{wc} + \mathbf{t}_{wcn} \quad (7)$$

2) 红外相机定位所使用的参考特征固定于打印平台底板上, 世界坐标系与打印机坐标系之间存在相似变换关系 T_{wg} , 该变换矩阵通过如下方式解算。

向打印机中输入一个三维坐标, 喷头运行至打印机坐标系内的对应位置 $P_{gn} = (X_{gn}, Y_{gn}, Z_{gn})^T$, 通过图像特征计算世界坐标系下相机模型的中心 P_{wc} , 并通过平移得到喷嘴中心坐标 $P_{wn} = (X_{wp}, Y_{wp}, Z_{wp})^T$, 将多组三维坐标测量结果带入式(8), 对坐标系相似变换关系 T_{wg} 进行求解。

$$\begin{bmatrix} X_{gp} \\ Y_{gp} \\ Z_{gp} \\ 1 \end{bmatrix} = T_{wg} \begin{bmatrix} X_{wp} \\ Y_{wp} \\ Z_{wp} \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c \times \mathbf{R}_{wg} & \mathbf{t}_{wg} \\ 0^T & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_{wp} \\ Y_{wp} \\ Z_{wp} \\ 1 \end{bmatrix} \quad (8)$$

在打印机运行过程中, 通过单目红外图像得到喷头位姿测量结果, 在打印机坐标系内完成了精度溯源与尺度统一。

2 打印姿态连续测量

本文通过红外相机采集的图像对相机实时位姿进行连续测量, 进而得到喷头在打印机坐标系内的运行轨迹。相对于可见光图像, 红外图像存在信噪比较低、分辨率不高等问题, 为提高系统测量精度, 本文对红外图像中的连续位姿测量进行了针对性的改进。

2.1 基于连续图像的全局式 SfM

从离散图像中重构出每一帧图像对应的相机位姿, 并对图像信息进行后续处理的技术被称为运动恢复结构 (structure from motion, SfM), 在已知

一幅图像中像素点与世界坐标系内空间点对应关系的情况下,计算相邻图像位姿的方法如图 7 所示。同一个空间点在相关联的图片内,二维特征具有较高的一致性,通过匹配算法对图像间的特征点进行匹配,将三维空间参考坐标传递给新的图像,建立新的 2D-3D 点对,实现了在连续图像中的位姿自动测量。

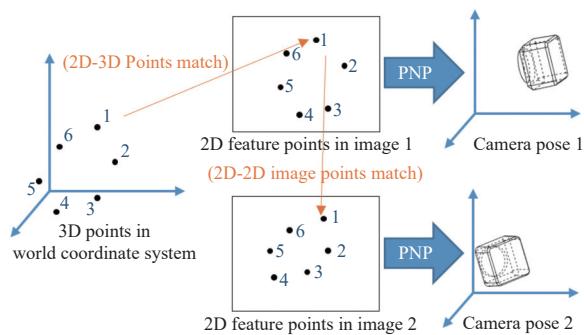


图 7 连续位姿测量原理

Fig. 7 Principle of continuous pose measurement

由于相机在运动过程中视场发生变化,三维坐标点在图像传递的过程中逐渐减少,通过三角测量法恢复图像中二维特征点的深度,建立新的空间坐标系,以多个相对位姿累加的方式计算相机位姿的方法被称为增量式 SfM,由于误差累加,该方法引入了更多的不确定度。全局式 SfM 对测量系统的设计有较高的要求,与图像特征点进行匹配的三维坐标始终统一在同一个空间参考坐标系内,避免了累加误差的引入,准确度相对更高。

2.2 红外平面参考特征

PNP 位姿计算的准确性受到图像中二维像素坐标精度的影响,在热成像中,高温物体的热量扩散改变了周围环境的温度,其几何边缘的稳定性较差;受限于工作原理,红外相机采集的图像信噪比较低,且缺少纹理信息;打印喷嘴等高温元件发出的红外辐射经过物体表面的反射后,在红外图像中形成红外伪影,对图像定位造成干扰。

在打印定位系统内设计稳定且易被识别的全局红外特征是十分必要的,本文为打印热床平台添加了如图 8 所示的红外棋盘格,以此为参考建立了相机位姿计算所使用的世界坐标系。



图 8 世界坐标系参考特征

Fig. 8 Reference of WCS

二维图像中的角点是指区域的边界或轮廓的连接点,在视场角变化时具有较高的稳定性,是三维重建、运动估计、图像配准等应用中的重要特征。通过非局部均值滤波算法对红外图像进行降噪处理,能够在较好地保留图像边缘与角点信息的同时,减少红外噪声。

Harris 角点检测方法通过滑动窗口遍历图像,根据像素点附近的灰度梯度变化判断该点是否符合角点特征。对打印过程中的红外图像进行全局角点检测的结果如图 9 所示。

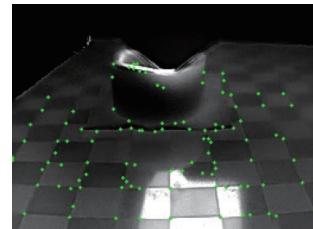


图 9 全局角点检测

Fig. 9 Full image corner detection

与其他类型的特征点相比,角点周围像素点的矢量与图像的灰度梯度相垂直,通过最小化误差函数迭代法可以将 Harris 角点的坐标精度从整数提升为像素内部的浮点数精度,提高几何测量的精度。

2.3 红外特征点匹配

笛卡尔式 FDM 打印机的工作过程中,安装于运行机构上的相机角度 R_{w0} 恒定,结合预设打印轨迹与打印速度可以估算出帧间相对平移 Δt_{w0} ,将 WCS 中的相机平移视作参考平面进行在 CCS 内的平移。特征点在相邻帧间进行了 $t_p = (x_t, y_t, z_t)^T$ 的空间运动,图像中的二维平面坐标 $p_1 = (u_1, v_1)^T$ 与 $p_2 = (u_2, v_2)^T$ 满足线性关系:

$$Z_{c2} \begin{bmatrix} u_2 \\ v_2 \\ 1 \end{bmatrix} = Z_{c1} \begin{bmatrix} u_1 \\ v_1 \\ 1 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} u_t \\ v_t \\ 1 \end{bmatrix} = Z_{c1} \begin{bmatrix} u_1 \\ v_1 \\ 1 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} f_x & 0 & 0 \\ f_y & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_t \\ y_t \\ z_t \\ 1 \end{bmatrix} \quad (9)$$

依据图像位姿测量的结果,对参考平面中棋盘格角点的空间坐标进行投影,得到全局空间参考点在图像中的理论二维坐标,用以补充在角点检测过程中,由于图像质量而未被检测到的参考特征点,进而得到相邻图像中匹配点的合理范围,实现连续图像间二维图像特征与全局空间坐标的匹配。

利用特征平面的单应性约束、参考平面在相机坐标系内的恒定角度与平移向量约束,剔除由于红外伪影、噪点等因素产生的误匹配点,图像位姿的连续测量结果符合 FDM 打印设备运动规律,实现了打印机坐标系内喷头运行轨迹的实时测量。

3 打印轨迹质量评估

红外图像反映了热加工过程中模型表面温度的时空变化^[14-15],是打印熔丝质量研究中的一种重要手段,通过热塑性材料的实时温度与形状分布,对轨迹打印的准确性与成型效果等进行分析。在本文所使用的方法中,依据喷头在打印坐标系内的空间运行轨迹,对当前图像中理想打印轨迹的形状进行计算,并与红外图像中的实际温度分布进行对比,得到当前打印质量的评价参数。

3.1 理想打印轨迹模型

喷嘴结构如图 10 所示,打印过程中喷嘴匀速挤出半融化状态的材料细丝,其直径通常与喷头口径一致,下表面附着在已打印完成的平面上,上表面被金属喷嘴压平,形成厚度一定的薄片,如图 11 所示。

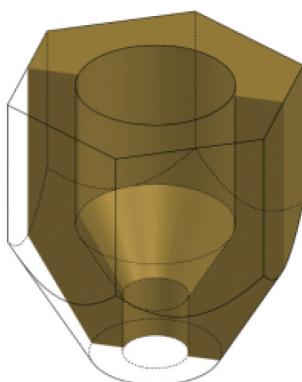


图 10 喷嘴结构剖面图

Fig. 10 Section diagram of nozzle structure

在半流体成型过程中,熔融材料轨迹的截面形状近似圆角矩形,如图 12 所示。红外相机与模型上表面存在一定夹角,打印轨迹在视场内是具有一定厚度的实体,将轨迹模型简化为台体,依据相

机在打印系统内的位姿,对工程文件中记录的理想打印轨迹进行投影。理想打印轨迹投影结果如图 13 所示,将具有一定体积的轨迹模型投影在像素平面内,中心曲线为打印工程中记录的喷嘴运行理想轨迹,是轨迹模型上表面的中心线。

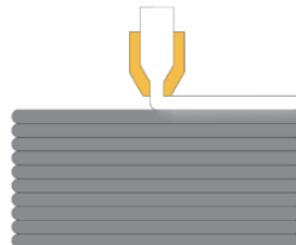


图 11 打印轨迹示意图

Fig. 11 Schematic diagram of printing trajectories



图 12 打印轨迹截面图

Fig. 12 Cross section diagram of printing trajectories

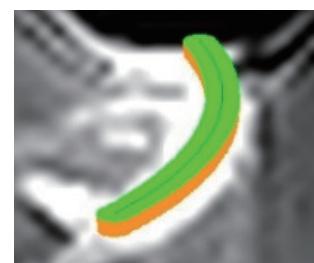


图 13 轨迹实体投影

Fig. 13 Projection of trajectory model

3.2 打印轨迹质量评估

红外图像反映了高温材料离开喷嘴后的形状与温度变化,熔融材料在模型上表面完成塑形后,在图像中表现为高亮度的轨迹线条。伴随着热塑性材料的冷却以及高温部分与低温部分之间热交换,图像中打印轨迹的亮度逐渐下降并呈现出较为复杂的几何形状与温度分布。通过对红外图像中的高温区域进行提取,得到高温材料在空间中的形态信息。

图 14 反映了正常打印过程中理想打印轨迹与红外图像中温度分布的对应关系,图 14(a)为原始红外图像,图 14(b)为红外图像中温度高于设定阈值的区域,图 14(c)为通过打印设备定位结果得到

的理想打印轨迹投影。正常打印过程中高温熔丝直径均匀, 材料温度变化稳定, 实际打印效果能够较好地对应理想轨迹的形态, 两者的交集如图 14(d)中区域所示。

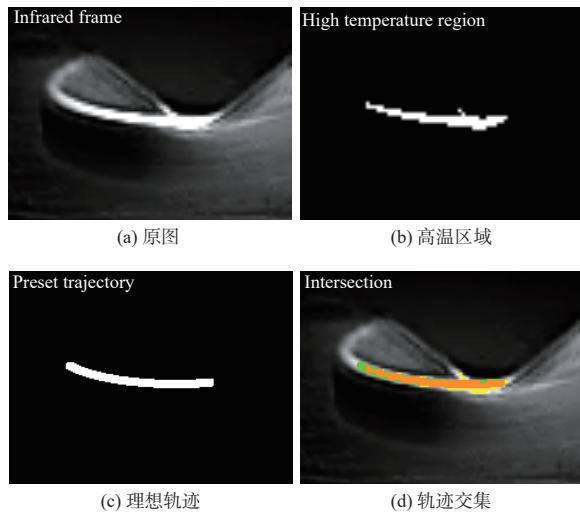


图 14 正常打印状态红外图像

Fig. 14 Infrared image of normal printing process

本文使用交并比 (intersection over union, IoU) 描述 2 个图像区域的重叠度, 对打印质量进行分析。放大后红外图像中高亮度区域 974 像素, 理想轨迹投影 948 像素, 2 个区域的交集面积除以它们的并集面积, 得到交并比为 0.64, 公式如下:

$$R_{IoU} = \frac{L_A \cap L_B}{L_A \cup L_B} \quad (10)$$

相较于正常打印状态, 针对 FDM 打印过程的异常检测是相关研究者们关注的重点。本文在后续试验部分对打印错位、喷头堵塞、材料溢出等 3 种异常打印过程的红外图像进行了分析, 通过图像中的高温区域以及交并比指标的变化, 系统能够对打印过程中出现的典型异常现象做出判断。

4 实验结果与分析

4.1 实验验证

为验证本文方法的有效性, 搭建了如图 15 所示的实验系统。红外相机安装于悬臂梁式 FDM 打印机挤出机的一侧, 对喷嘴工作状态进行拍摄, 棋盘格遮光片作为定位靶标, 安装于加热底板上。

实验使用的悬臂梁打印机喷头直径为 0.4 mm, 经过机械校准后, XY 方向光轴的理论定位精度为 0.0125 mm, Z 轴丝杠的理论定位精度为 0.0025 mm; 氧化钒非制冷焦平面红外相机分辨率为 256×192

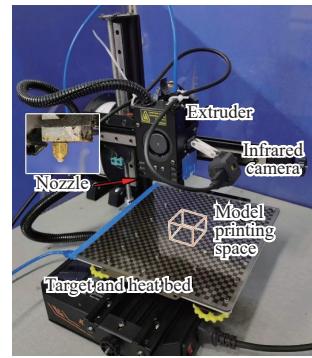


图 15 实验设备实物图

Fig. 15 Experimental equipment

像素, 镜头视场角为 $44.9^\circ \times 33.4^\circ$, 帧率为 25 帧/s; 参考棋盘格的方格边长为 5 mm, 表面印刷精度为 ± 0.005 mm。

4.2 系统标定结果

在安装红外相机之前, 对透射红外热源靶标进行多个角度的拍摄, 通过张正友标定法对红外相机内参进行标定, 结果如表 1 所示。

表 1 红外相机标定参数

Table 1 Infrared camera calibration parameters

参数	标定值
$[f_x, f_y]/\text{pixel}$	[334.767, 334.217]
$[u_0, v_0]/\text{pixel}$	[126.215, 100.097]
k_1, k_2, k_3, p_1, p_2	[-0.4112, 0.1012, 0.0008, -0.1810, 0.9387]

在实验平台搭建完成后, 调整相机角度使其能够较好地对打印模型上表面进行拍摄。使用 1.4 小节中介绍的方法, 对相机与喷嘴的相对位姿以及参考坐标系与打印机坐标系之间的相似变换关系进行标定, 两坐标系之间存在 $[1.5610, 1.5594, -0.9648]$ (单位: rad) 的旋转, 以及 $[-60.7, 23.2, -17.7]$ (单位: mm) 的平移, $P_{Gp} = T_{WG} \times P_{Wp}$, 变换矩阵为

$$\begin{bmatrix} 1.0053 & -0.0125 & -0.0017 & 106.49 \\ 0.0125 & 1.0053 & -0.0035 & 77.61 \\ 0.0017 & 0.0035 & 1.0054 & -0.39 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (11)$$

4.3 打印轨迹检测及结果

本文通过红外图像中的高温区域与理想打印轨迹的重合度, 以及高温区域的面积对打印质量进行评估。在实验环节, 将圆柱体模型第 15 层内壁与外壁的打印过程进行了对比试验, 以正常打印过程作为对照组, 通过修改打印工程文件, 人为添加异常的方式, 分别进行了模型错位、出料不足、出料过多等 3 种异常打印过程的对比试验。

模型打印过程的详细参数如下: 圆柱体直径 14 mm, 使用白色 PLA 材料进行打印, 喷嘴温度 205℃, 热床 60℃, 打印机喷嘴口径 0.4 mm, 层高 0.2 mm, 运行速度 600 mm/min, 模型内部填充率 15%, 填充结构为空间立方体。

将重投影误差作为评价系统运行过程中位姿测量精度的依据, 结果如图 16 所示。图 16 中横轴为图像帧号, 柱状图反映了图像位姿测量的重投影误差(单位: 像素), 剔除误匹配角点后, 参与位姿测量的红外特征点平均数量为 16.5, 打印过程中系统平均重投影误差为 0.7 像素, 角度测量的平均误差为 (0.004, 0.004, 0.006)(单位: rad), 处理红外图像的平均耗时为 25.9 ms, 满足准确性与实时性要求。

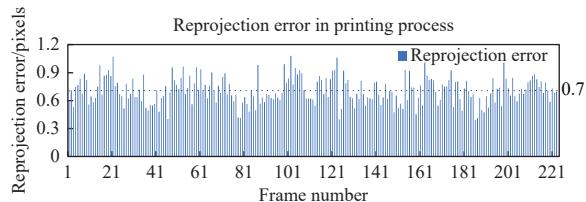
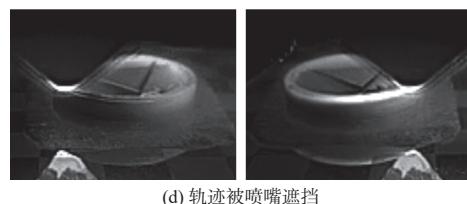
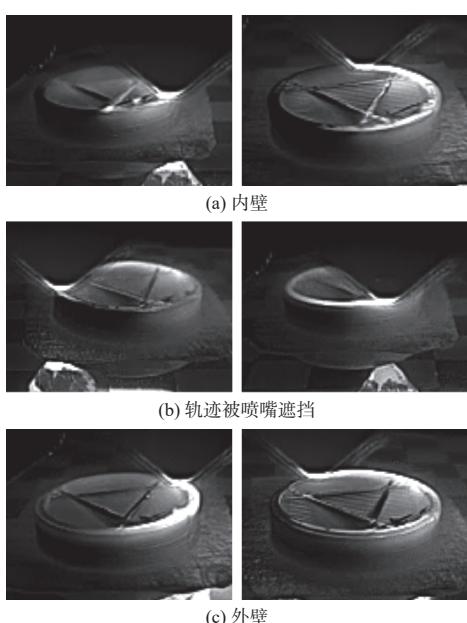


图 16 打印过程重投影误差

Fig. 16 Reprojection error in printing process

圆柱体模型打印周期的红外图像表现如图 17 所示, 喷头以逆时针方向依次对模型外壳的内壁、外壁结构进行打印。在打印周期的大部分时间内, 红外图像反映了不同角度下高温熔丝的空间形态, 喷头运行至圆周最左侧时, 部分高温轨迹被喷嘴遮挡, 红外图像中的温度分布与真实打印状态出现偏差。



(d) 轨迹被喷嘴遮挡

图 17 圆柱内外壁打印过程红外图像

Fig. 17 Infrared image in printing process of cylinder inner and outer wall

图 18 反映了正常打印过程中每一帧图像中高温区域面积和交并比的变化。图中横轴为图像帧号, 柱状图反映了每一帧图像中高温轨迹的面积(单位: 像素), 折线为高温面积与理想轨迹的交并比。打印过程中, 高温区域面积与交并比同时下降的情况出现在第 60 帧、170 帧附近, 对应了喷头圆周运动到达最左侧, 打印轨迹完全被喷头遮挡的现象。正常打印全过程的平均交并比为 0.55, 高温轨迹未被遮挡的图像占总帧数的 75.5%, 在这部分图像中平均交并比为 0.61, 反映了系统在理想打印状态下, 计算得到的理想轨迹与实际打印轨迹的重叠效果。

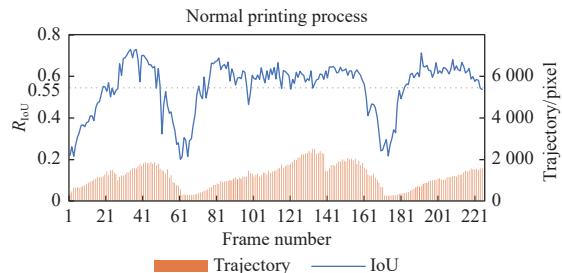
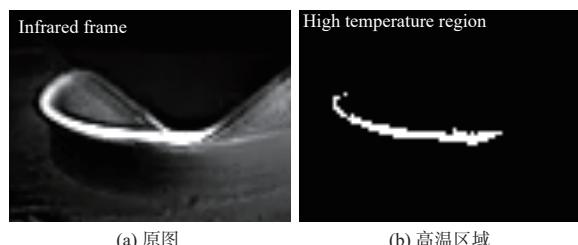


图 18 正常打印过程高温区域面积与交并比

Fig. 18 High temperature area and IoU in normal printing process

在对比实验中, 本文通过修改打印工程文件, 添加异常参数的方式, 复现 FDM 打印中模型错位、喷头堵塞、材料溢出等 3 种典型打印异常。

图 19(a)反映了喷头 Y 坐标减少 1 mm 的错位打印状态下的红外图像, 画面中高温区域图 19(b)相对于理想打印轨迹图 19(c)整体向左侧偏移, 两者相交的区域如图 19(d)所示。



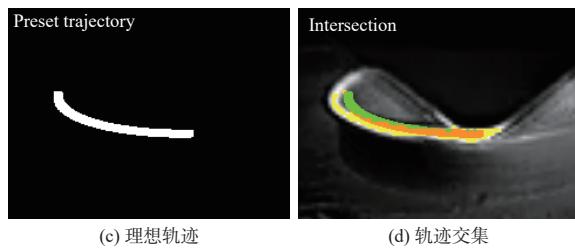


图 19 模型错位时的红外图像

Fig. 19 Infrared image of misalignment printing process

图 20 为模型错位现象发生时, 相同模型的打印过程中图像高温区域面积(柱状图)和交并比(折线图)的变化。图表中红外图像中高温部分的面积大小与分布趋势与正常打印过程相似, 打印全过程的平均交并比为 0.29, 相较于正常打印状态下降显著。图中交并比在第 85 帧、150 帧、195 帧暂出现峰值, 符合三角函数的周期变化。对应喷头圆周运动在 X 轴方向到达极值附近时, Y 轴方向错位对打印轨迹造成的偏移相对较小的状态。

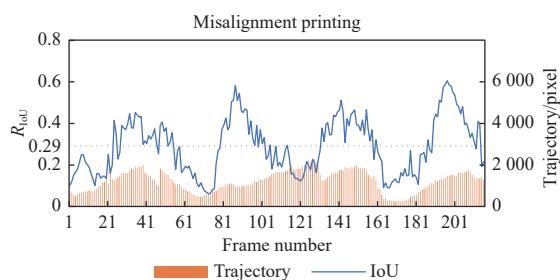


图 20 错位打印过程高温区域面积与交并比

Fig. 20 High temperature area and IoU in misalignment printing process

图 21(a)反映了打印出料减少 90%, 出料不足打印状态下的红外图像, 在这种打印异常中, 打印熔丝呈现为不连续团块, 且温度下降速度更快, 画面中高温区域的检测结果如图 21(b)所示, 图 21(c)中理想打印轨迹的长度配合图像温度区域分布做出相应调整, 两者相交的区域如图 21(d)中柱状图区域所示。

图 22 为出料不足现象发生时, 相同模型的打印过程中, 图像高温区域面积(柱状图)和交并比(折线图)的变化。图像内高温面积小于正常打印状态, 高温区域与理想轨迹的平均交并比为 0.42, 与正常打印状态相比整体降低, 由于实际高温熔丝的不连续, 交并比在帧间出现明显波动。

图 23(a)反映了打印出料增加为正常状态的 200%, 出料过量打印状态下的红外图像, 打印熔丝散热速度下降, 画面中高温区域的检测结果如

图 23(b)所示, 图 23(c)中理想打印轨迹小于图像高温区域, 两者相交的区域如图 23(d)中柱状图所示。

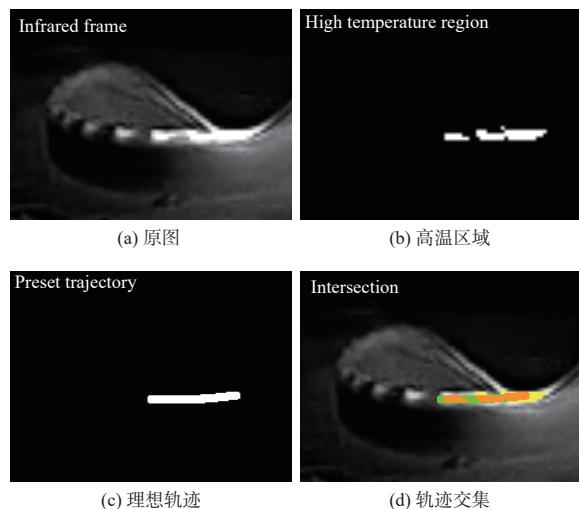


图 21 出料不足状态红外图像

Fig. 21 Infrared image of insufficient printing process

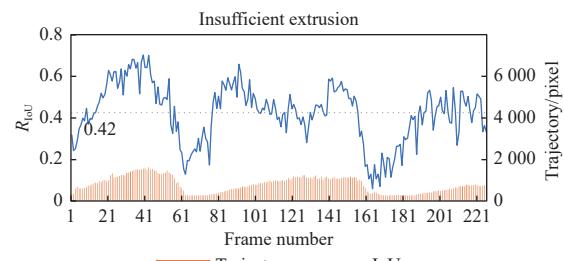


图 22 出料不足状态的打印高温区域面积与交并比

Fig. 22 High temperature area and IoU in insufficient extrusion printing

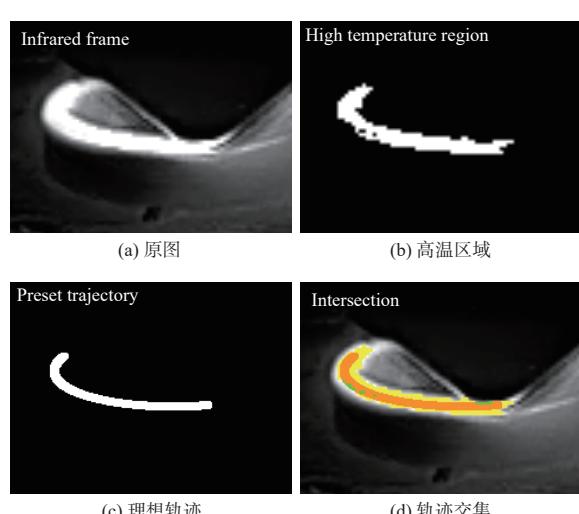


图 23 出料过量状态红外图像

Fig. 23 Infrared image of excessive printing process

图 24 为出料过量现象发生时, 相同模型的打印过程中图像高温区域面积(柱状图)和交并比(折线图)的变化。图像内高温面积远高于正常打印状态, 高温区域与理想轨迹的平均交并比为 0.40, 与正常打印状态相比整体降低。

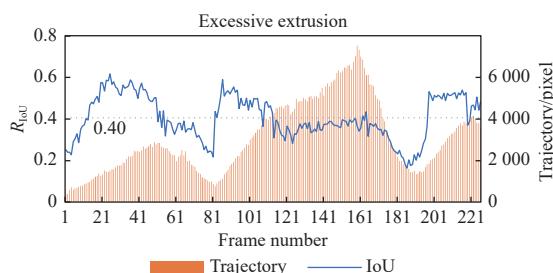


图 24 出料过量状态的打印高温区域面积与交并比

Fig. 24 High temperature area and IoU in excessive extrusion printing

正常打印过程与模型错位、出料过少、出料过多等 3 种典型异常打印过程的对比实验表明, 定位系统对理想打印轨迹的计算结果具有准确性, 通过打印过程中红外图像与理想打印轨迹的对比, 评价熔丝打印质量, 并对打印过程进行异常检测, 该方法具有一定的可行性。

5 结论

本方法通过红外相机对 FDM 打印机的热加工过程进行检测, 以打印系统坐标系作为基准, 对设备运行位姿进行实时测量, 建立了数字模型与图像中高温熔丝间的对应关系, 对打印质量进行评价。实验结果表明, 图像处理平均耗时为 25.9 ms, 满足打印过程在线检测的实时性需求。红外相机位姿测量的重投影误差为 0.7 像素, 正常打印状态下, 系统计算得到的理想打印轨迹与红外图像内高温区域的平均交并比为 0.61, 轨迹模型具备可靠性。在对比实验环节, 在模型错位、出料过少或过多等典型异常问题出现时, 图像高温区域与理想打印轨迹的指标发生变化, 验证了本方法在 FDM 打印异常检测中的有效性, 后续将针对打印模型翘曲、断层、坍塌等更多打印异常的红外表现开展进一步深入研究。本文所提出的检测系统设计结合了打印设备的结构特点与红外特性, 能够部署于大部分 FDM 打印设备中, 为打印质量在线检测的相关研究提供了一种新的解决途径。

参考文献:

- [1] 葛正浩, 岳奇, 吉涛. 3D 打印控制系统研究综述 [J]. 现代制造工程, 2021(10): 154-162.
- GE Zhenghao, YUE Qi, JI Tao. An overview of the research on 3D printing control systems [J]. Modern Manufacturing Engineering, 2021(10): 154-162.
- [2] CHEN W J, HO J H, MUSTAPHA K B, et al. A vision based system for anomaly detection and classification in additive manufacturing [C]//2019 IEEE Conference on Sustainable Utilization and Development in Engineering and Technologies (CSUDET). Malaysia: IEEE, 2019: 87-92.
- [3] BECKER P, SPIELBAUER N, ROENNAU A, et al. Real-time In-situ process error detection in additive manufacturing [C]//2020 Fourth IEEE International Conference on Robotic Computing (IRC). Taiwan, China: IEEE, 2020: 426-427.
- [4] KOPSACHEILIS C, CHARALAMPOUS P, KOSTA-VELIS I, et al. In situ visual quality control in 3D printing [C]//11th International Conference on Information Visualization Theory and Applications. [S.I.]: [S.n.], 2020: 317-324.
- [5] RACHMAWATI S M, PARAMARTHA PUTRA M A, JUN T, et al. Fine-tuned CNN with data augmentation for 3D printer fault detection [C]//2022 13th International Conference on Information and Communication Technology Convergence (ICTC). Korea: IEEE, 2022: 902-905.
- [6] 屈晨光, 张师军, 高达利, 等. 环境温度对 3D 打印成型精度的影响 [J]. 塑料工业, 2015, 43(8): 53-55.
- QU Chenguang, ZHANG Shijun, GAO Dali, et al. Effect of ambient temperature on the 3D printing molding precision [J]. China Plastics Industry, 2015, 43(8): 53-55.
- [7] 徐子又, 胡镔, 邢泽华, 等. 层间预熔温度对熔融沉积成型打印件力学性能的影响 [J]. 塑料科技, 2019, 47(5): 37-43.
- XU Ziyou, HU Bin, XING Zehua, et al. Effect of interlayer premelting temperature on mechanical properties of fused deposition molded printed parts [J]. Plastics Science and Technology, 2019, 47(5): 37-43.
- [8] 张金立, 施一萍, 刘瑾, 等. 非封闭式 FDM 3D 打印机喷头温度控制器研究 [J]. 传感器与微系统, 2021, 40(1): 53-55.
- ZHANG Jinli, SHI Yiping, LIU Jin, et al. Research on temperature controller of non-closed FDM 3D printer nozzle [J]. Transducer and Microsystem Technologies, 2021, 40(1): 53-55.
- [9] WANG F F, JU F, ROWE K, et al. Real-time control for

- large scale additive manufacturing using thermal images[C]//2019 IEEE 15th International Conference on Automation Science and Engineering (CASE). Canada: IEEE, 2019: 36-41.
- [10] POOLADVAND K, SALERNI A D, FURLONG C. In-situ thermal monitoring of printed components during rapid prototyping by fused deposition modeling[M]//Conference Proceedings of the Society for Experimental Mechanics Series. Cham: Springer International Publishing, 2020: 131-140.
- [11] ZHANG Z Y. A flexible new technique for camera calibration[J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2000, 22(11): 1330-1334.
- [12] 王谭, 王磊磊, 张卫国, 等. 基于张正友标定法的红外靶标系统[J]. *光学精密工程*, 2019, 27(8): 1828-1835.
WANG Tan, WANG Leilei, ZHANG Weiguo, et al. Design of infrared target system with Zhang Zhengyou calibration method[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2019, 27(8): 1828-1835.
- [13] COLLINS T, BARTOLI A. Infinitesimal plane-based pose estimation[J]. *International Journal of Computer Vision*, 2014, 109(3): 252-286.
- [14] 宋栓军, 邱成鸿, 徐微, 等. 红外热像下激光熔丝成形过程冷却速率实时监测[J]. *红外与激光工程*, 2022, 51(11): 3788/IRLA20220074.
SONG Shuanjun, QIU Chenghong, XU Wei, et al. Real time monitoring of cooling rate in laser metal-wire forming process under infrared thermography[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2022, 51(11): 3788/IRLA20220074.
- [15] 朱进前, 凌泽民, 杜发瑞, 等. 激光熔丝增材制造温度场的红外热像监测[J]. *红外与激光工程*, 2018, 47(6): 0604002.
ZHU Jinqian, LING Zemin, DU Farui, et al. Monitoring of laser metal-wire additive manufacturing temperature field using infrared thermography[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2018, 47(6): 0604002.