

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2412982

基于双目背景纹影法的轴对称温度场 自适应重构方法研究*

吴 军¹, 王小宇¹, 唐源鸿¹, 张 震¹, 郭润夏²

(1. 中国民航大学航空工程学院 天津 300300; 2. 中国民航大学电子信息与自动化学院 天津 300300)

摘要:温度场测量在工业生产、制造领域有着非常重要的意义,纹影法作为一种流场可视化技术,可实现温度场的非接触式测量。然而,传统背景纹影法解算光线偏折角时需精确测量流场的中心坐标,这就极大限制了在某些工业测试领域中的应用。针对这种问题,本文提出一种基于双目背景纹影法的轴对称温度场自适应重构方法。首先通过双目背景纹影成像系统从两个方向采集温度场纹影成像,然后利用 PnP 算法通过单目视觉成像技术解算背景散斑板相对于双目相机的位置参数,进而解算温度场中心坐标,最后通过纹影法重构温度场分布。实验结果表明,本方法可以在对未知中心坐标的温度场进行精确重构,极大地拓展了纹影法的应用范围。

关键词: 温度场; 背景纹影法; 双目视觉; PnP 算法

中图分类号: TB96 TH7 文献标识码: A 国家标准学科分类代码: 470.2010

Study on the adaptive reconstruction method of axisymmetric temperature field based on binocular background oriented Schlieren method

Wu Jun¹, Wang Xiaoyu¹, Tang Yuanhong¹, Zhang Zhen¹, Guo Runxia²

(1. College of Aeronautical Engineering, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China;
2. Electronic Information and Automation College, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China)

Abstract: Temperature field measurement plays a crucial role in industrial production and manufacturing. As a visualization technique for flow fields, the Schlieren method enables non-contact measurement of temperature fields. However, traditional background Schlieren methods require precise measurement of the center coordinates of the flow field when calculating the angle of light deflection, which greatly limits their application in certain industrial testing fields. To address this issue, this paper proposes a method for adaptive reconstruction of axisymmetric temperature fields based on binocular background Schlieren. Firstly, temperature field Schlieren imaging is obtained from two directions using a binocular background Schlieren imaging system. Then, the Perspective-n-Point (PnP) algorithm is employed with monocular visual imaging technology to calculate the position parameters of the background scatter plate relative to the binocular camera, thereby determining the center coordinates of the temperature field. Finally, the temperature field distribution is reconstructed using the Schlieren method. Experimental results show that this method enables precise reconstruction of temperature fields with unknown center coordinates, significantly expanding the application scope of the Schlieren method.

Keywords: temperature field; background Schlieren method; binocular vision; PnP algorithm

0 引 言

温度是确定物质状态最重要的参数之一^[1],温度场测量在工业上有着重要的应用。在许多制造过程中,如

金属加工、化工生产和食品加工等,温度是一个关键参数。通过测量温度,可以监控和控制生产过程,确保产品质量,并最大程度地提高生产效率和能源利用率^[2]。还有在工业设备中,温度的变化可能会暗示着设备的运行状态和性能。通过实时监测温度,可以及时发现设备故

障或异常,并采取预防性维护措施,以避免生产中断和损失^[3]。除此之外,在一些工业环境中,高温或低温可能会对人员和设备造成危险^[4]。因此,监测温度变化可以帮助确保工作场所的安全,并及时采取必要的措施,以防止事故发生。温度场的测量在工业生产环境中环境监测等方面有着重要的作用。

传统的测温方法从测量方式上可分为接触式和非接触式两种^[5],接触式测温主要为热电偶技术。张天宇等^[6]通过对复杂场景下三维曲面的温度进行了修正,修正前后的结果通过热电偶来进行对比。2024 年杨玉强等^[7]采用悬浮芯光纤与单模光纤错位熔接,成功在同一光纤内制备出基于法布里-珀罗 (Fabry-Perot interferometer, FPI) 和迈克尔逊干涉仪 (Michelson interferometer, MI) 并联的全光纤温度传感器,解决了小空间内大体积传感器无法实现温度检测的问题。除此之外,陈相洪等^[8]提出了一个多芯高精度批量测温系统及方法以提高效率,最终测试几款经典高精度温度传感器,系统表现出可对 0.031℃ 测温精度的传感器进行准确测试,满足测温需求。但是,对于流场的测温接触式测温会破坏流场的结构导致测量结果不准确。在非接触式测温技术中,常见的光学测温技术有红外辐射测温 (infrared thermometry, IR), 激光诱导荧光 (laser induced fluorescence, LIF) 技术,可调谐二极管激光法 (tunable diode laser absorption spectroscopy, TDLAS) 技术^[9] 以及热波技术 (thermography) 和纹影技术 (Schlieren imaging)^[10] 等。作为一种常用光学测温技术, LIF 测温技术具有高灵敏度、高分辨率和高精度等优点,适用于对局部温度进行高精度测量的场景,但是,这种测温技术较为复杂,对环境的要求较高^[11]。TDLAS^[12-13] 是一种高精度、非接触、实时性强的温度测量技术,在特定的应用场景下具有重要的优势,但是,这种测温技术的成本跟复杂性较高。除此之外,近年来冷原子测温^[14] 也在飞速发展,冷原子测温的精度极其精确,但是,它只能测量微观尺度物体的温度,不能测量宏观物体。在复杂的工业现场,如何采用尽量精简的设备获取三维温度场是当前研究的热点,而纹影法具备这样的潜力。

纹影技术诞生于 1884 年由 Toepler 提出,最初纹影法只能对流场进行定性的观察。随着需求增加,纹影定量测量技术逐渐受到重视。然而,为了解决纹影系统中像面光强与偏折角的定量关系这一问题,很多新的纹影技术诞生了,其中包括定标纹影法、彩虹纹影法以及背景纹影法^[15-16]。

2021 年 Contreras 等^[17] 将彩虹纹影技术被应用于 TinyLev 声悬浮系统,用于可视化不同类型的悬浮系统产生的声势,彩虹纹影能够实时可视化声场的二维投影,其所得图像与声压模拟结果吻合较好。但是,该纹影系统

中的彩色滤光片制作要求比较高。2009 年, Alvarez-Herrera 等^[18] 为了实现纹影法对温度的定量计算,提出了定标纹影法,但是定标纹影法的测量系统所需的光学元件较多,实验成本高。21 世纪初, Richard 等^[19-20] 在传统纹影的基础上发展了背景纹影技术 (background oriented Schlieren, BOS)。背景纹影系统设置简单、使用灵活、成本较低,在国内外研究中已有广泛的应用。Cakir 等^[21] 将背景纹影法与光流法结合解决了 BOS 图像分辨率和灵敏度下降的特性。蔡华俊等^[22] 将背景纹影法与层析成像技术 (computed tomography, CT) 结合对瞬态的三维密度场进行了三维重构。除此之外,张彪等^[23] 将背景纹影法与层析技术结合将火焰三维温度场重构了出来,重构结果能很好的展示出火焰的轮廓。上述纹影法在重构温度场时都需要偏折角信息,而测量偏折角的时候则需要知道相机与温度场中心的距离,在温度场中心位置无法准确获取时上述的传统纹影法就无法准确的计算偏折角,这对纹影法的应用产生了极大地限制。

针对这一问题,本文提出一种双目 BOS 测量方法,根据双目相机的位姿关系以及利用透视 n 点问题 (perspective-n-point, PnP) 解算每个相机与其对应的背景板之间的关系来确定待测温度场的中心位置,位置确定后利用传统的背景纹影法来重构待测温度场。实现了在温度场位置未知时,对温度场进行精确重构。相较于传统背景纹影法测温,本文提出的方法不再需要手动测量温度场中心位置到背景板及相机的距离,通过本文提出的算法可以直接精确解算出温度场中心的位置,进而消除了由于手动测量不准确而引入的系统误差,进而提高了温度场测量的效率。

1 温度场中心位置偏移对测量的影响

1.1 背景纹影法重构轴对称温度场的原理

根据光的波动理论,光线在经过均匀分布的折射率场时不会发生偏折,当折射率场发生扰动,光线的传播轨迹就会发生一定的偏折。纹影技术的原理就是基于光线在折射率梯度介质中的折射现象。

偏折角就是折射率梯度延同方向光程的积分,即折射率梯度的 Radon 变换。由此得出光线偏折角的计算公式:

$$\theta_x = \frac{1}{n} \int_{ray} \frac{\delta n}{\delta x} dz \quad (1)$$

那么折射率场能够利用逆 Radon 变换来重构,对于轴对称的折射率场,可以使用 Abel 逆变换来重构。

如图 1 所示假设待测温度场为轴对称分布,光线经过温度场时的偏折角为 θ_x 。经过 Abel 逆变换可以得到

径向上折射率的分布,表达式可写为:

$$n(r) = -\frac{1}{\pi} \int_r^R \theta \frac{dx}{\sqrt{x^2 - r^2}} + n_0 \quad (2)$$

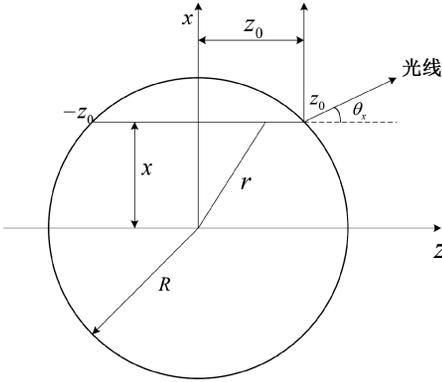


图1 光线经过温度场的路径

Fig. 1 The path of light processing temperature field

利用式(2)得到折射率径向分布之后,根据轴对称温度场的特性,假设轴对称温度场的截面是圆形的,那么圆的内部每个点的折射率都能计算得到,当沿径向分布的折射率不在发生变化时,圆的边界也就是折射率场的边界也就找到了。根据如下公式可以计算当地的环境折射率:

$$n(T) = 1 + \frac{0.079\ 766\ 3}{T} \quad (3)$$

折射率与温度之间的关系可以根据理想气体状态方程与格拉斯通-戴尔公式推导出来:

$$T = \frac{n_0 - 1}{n - 1} T_0 \quad (4)$$

其中, n_0 为环境折射率, T_0 是环境温度。

在实际测试环境中偏折角可以由光线的几何关系来计算得出,如图2所示,光线由背景板发出,实线为加入流场之前的光线路径,虚线为加入流场之后的光线路径,2条光线在图像传感器上的投影的距离为同一散斑的像素偏移量。利用PIV互相关算法对有无流场前后的图像进行分析,选择合适的迭代窗口,计算图像中所有散斑的偏移量。

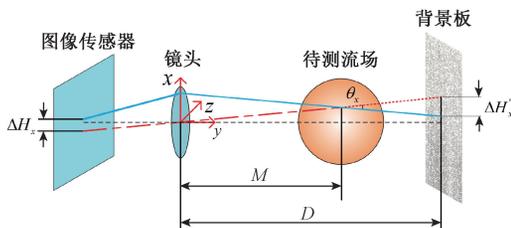


图2 背景纹影法原理

Fig. 2 Schematic diagram of the background Schlieren method

M 为相机待测流场中心的距离, D 是相机到背景板的距离。根据近光轴假设 x 方向偏折角为:

$$\theta_x = \left(1 + \frac{M}{D - M}\right) \times \frac{\Delta H'_x}{D} \quad (5)$$

由式(5)能够推导出 $d\theta$ 与 dM 之间的关系

$$d\theta_x = \left(\frac{\Delta H'_x}{D(D - M)^2} + \frac{\Delta H'_x}{D}\right) dM \quad (6)$$

式中: $\Delta H'_x$ 为相机分辨率和 ΔH_x 之积。通过上述方法能够得到背景板上散斑的偏移量,能对待测流场任意高度的截面进行重构,只考虑水平方向的位移,将水平方向上的偏移量代入式(5)就能够得到该截面的偏折角数据。当温度场在某一位置上时,光线经过该温度场的偏折角 θ_x 已知记为 θ , 那么通过测量得出偏折角后,此时温度场的求解公式如下:

$$T = \frac{n_0 - 1}{-\frac{1}{\pi} \int_r^R (\theta + d\theta) \frac{dx}{\sqrt{x^2 - r^2}} + n_0 - 1} T_0 \quad (7)$$

1.2 温度场中心偏移对重构精度的影响分析

为了定量验证温度场中心测量不准确对温度场重构产生的影响,本文将采用仿真的方式进行定量分析。如图3所示,在MATLAB中构造一个轴对称的温度场,温度场的表达式为:

$$T = \frac{900}{\pi} e^{\frac{x^2 + y^2}{500}} + 293 \quad (8)$$

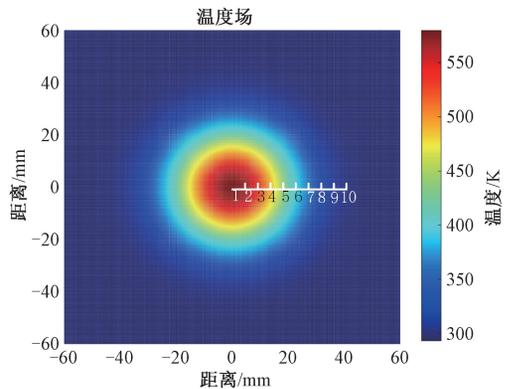


图3 轴对称温度场

Fig. 3 Axisymmetric temperature field

其温度场的中心位置在坐标系的中心,中心位置的坐标记为 $(0, 0)$, 相机光心距离温度场中心的距离为 500 mm, 背景板距离温度场中心的距离为 700 mm, 以此位置重构出的温度场为真实值, 每当温度场中心测量误差增加 5 mm 构一次温度场分析偏移后重构出的温度场与真实值之间偏差。

根据 1.1 节背景纹影法重构温度场的方法重构出初始位置的温度场分布如图4所示。

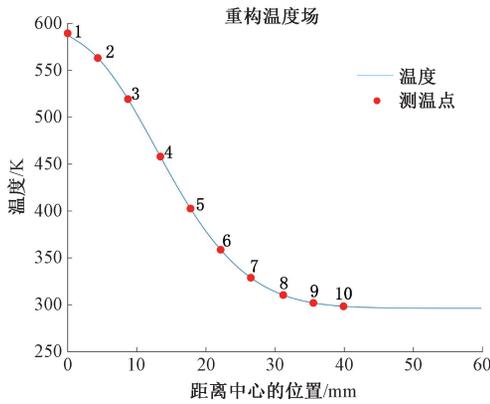


图 4 温度场分布

Fig. 4 Distribution of temperature field

温度场与相机距离的测量值每偏差 5 mm, 计算重构温度场所测量的误差, 选 10 个点的温度值进行比较得出的温度测量偏差如表 1 所示。

表 1 测量温度偏差

Table 1 Temperature measurement deviation

测量序号	偏移量	温度偏差/K	测量序号	偏移量	温度偏差/K
1 号点	5	0.11	6 号点	5	2.05
	10	0.12		10	4.02
	15	0.07		15	5.98
	20	0.17		20	7.93
	25	0.20		25	9.80
2 号点	5	0.41	7 号点	5	1.70
	10	0.74		10	3.31
	15	1.03		15	4.91
	20	1.47		20	6.48
	25	1.82		25	7.95
3 号点	5	1.01	8 号点	5	1.21
	10	2.00		10	2.34
	15	2.88		15	3.50
	20	3.93		20	4.53
	25	4.92		25	5.52
4 号点	5	1.68	9 号点	5	0.75
	10	3.30		10	1.43
	15	4.92		15	2.10
	20	6.62		20	2.72
	25	8.27		25	3.28
5 号点	5	2.08	10 号点	5	0.10
	10	4.10		10	0.75
	15	6.10		15	1.10
	20	8.13		20	1.41
	25	10.10		25	1.67

表 1 表示 $\Delta H'_x$ 不变, 温度场往背景板的方向发生偏移时, 重构的温度场与真实值之间的会有误差, 整体的误差会随着距离的变大而增大, 由此可以得出温度场中心测量值与真实值发生偏差时, 偏差量越大, 产生的测量误差越大。

2 基于双目背景纹影法的轴对称温度场中心求解方法

根据光线经过温度场中心不发生偏折这一特性, 得知温度场中心对应的像素坐标、相机的光心和背景板上对应的光线经过温度场中心的点在同一直线上, 那么解算出两条经过温度场中心的直线方程, 这两条直线的交点位置就是被测温度场的中心的位置。实现以上问题的前提是将 4 个点转换到同一坐标系下。

双目 BOS 的原理图如图 5 所示, 根据双目相机标定能够得出 A、B 2 个相机的内参矩阵以及 2 个相机的位姿关系。在已知相机内参、背景板上 3 个或 3 个以上点的像素以及它们的实际位置, 可利用 PnP 算法解算出背景板与对应相机的位置关系, 即能够解算出相机坐标系与世界坐标系之间的外参, 从而将每个点的坐标都转化到相机坐标系下。

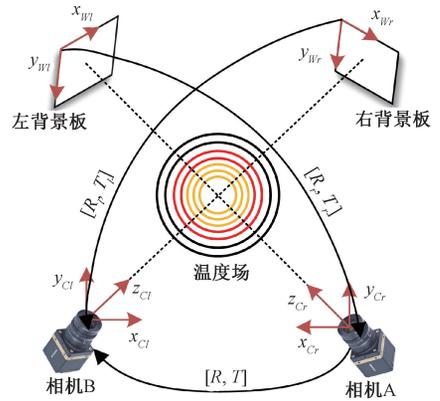


图 5 双目 BOS 原理

Fig. 5 Binocular BOS schematic diagram

图 6 为 PnP 算法的原理图, 解决 PnP 问题的方法有直接线性变换法 (direct linear transform, DLT)、高效 PnP (efficient PnP, EPnP) 和 P3P 等, 本文主要采用的是 EPnP 算法来解决这一问题。EPnP 算法先选择 4 个控制点, 这 4 个控制点满足共面性、非共线性、空间分布均匀以及易检测, 然后解算出相机坐标系下的 4 个控制点坐标, 最后采用迭代最近点算法 (iterative closest point, ICP) 求解。

首先选择三维参考点的重心为第 1 个控制点:

$$c_1^w = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n p_i^w \quad (9)$$

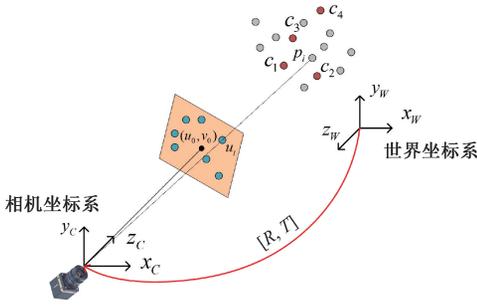


图6 PnP算法原理

Fig. 6 Schematic diagram of the PnP algorithm

c_i^w 表示4个控制点在世界坐标系中的坐标,进而得到矩阵:

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} p_1^w - c_1^w \\ \vdots \\ p_n^w - c_n^w \end{bmatrix} \quad (10)$$

p_i^w 表示点世界坐标系下点的三维坐标。记 $\mathbf{A}^T \mathbf{A}$ 的特征值为 $\lambda_i^c, i=1,2,3$ 对应的特征向量为 $v_i^c, i=1,2,3$ 那么剩余的3个控制点可以按照下面的公式来确定:

$$c_j^w = c_1^w + \lambda_{c,j-1}^{1/2} v_{c,j-1}^c \quad j=2,3,4 \quad (11)$$

设 \mathbf{K} 是相机的内参矩阵, $\{u_i\} i=1,2,\dots,n$ 是参考点 $\{p_i\} i=1,2,\dots,n$ 的2D投影坐标即像素坐标则:

$$w_i \begin{bmatrix} u_i \\ 1 \end{bmatrix} = \mathbf{K} p_i^c = \mathbf{K} \sum_{j=1}^4 \alpha_{ij} c_j^c \quad (12)$$

c_j^c 是计算控制点在相机坐标系下的坐标。参考点在相机坐标系下的坐标是:

$$p_i^c = \sum_{j=1}^4 \alpha_{ij} c_j^c \quad i=1,2,\dots,n \quad (13)$$

c_i^c 为控制点在相机坐标系下的坐标, α_{ij} 为重心的坐标。 $\{p_i^w\} i=1,2,\dots,n$ 的重心 p_0^w 和矩阵 \mathbf{A} 为:

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} p_1^w - p_0^w \\ \vdots \\ p_n^w - p_0^w \end{bmatrix} \quad (14)$$

$$p_0^w = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n p_i^w \quad (15)$$

$\{p_i^c\} i=1,2,\dots,n$ 的重心 p_0^c 和矩阵 \mathbf{B} :

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} p_1^c - p_0^c \\ \vdots \\ p_n^c - p_0^c \end{bmatrix} \quad (16)$$

$$p_0^c = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n p_i^c \quad (17)$$

令 $\mathbf{H} = \mathbf{B}^T \mathbf{A}$, 计算 \mathbf{H} 的SVD分解: $\mathbf{H} = \mathbf{U} \mathbf{\Sigma} \mathbf{V}^T$, 其中旋

转矩阵 $\mathbf{R} = \mathbf{U} \mathbf{V}^T$, 平移矩阵 $\mathbf{T} = p_0^c - \mathbf{R} p_0^w$ 。

用 PIVLab 计算出在某一高度上温度场中心的像素坐标, A 相机对应的像素坐标为 (u_1, v_1) , B 相机对应的像素坐标为 (u_2, v_2) , 根据像素坐标与世界坐标的转换关系式:

$$\begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \\ 1 \end{bmatrix} = [\mathbf{R}, \mathbf{T}]^{-1} \mathbf{K}^{-1} \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} \quad (18)$$

$[\mathbf{R}, \mathbf{T}]$ 为相机坐标系与世界坐标系的外参, 通过 PnP 算法可以求得, \mathbf{K} 为相机的内参矩阵。根据上式能够得出世界坐标系下温度场中心像素点对应的世界坐标, 由于通过温度场中心位置的光线不发生偏折且通过温度场的横截面, 且2个相机位于同一高度, 那么很容易得出光线经过两个背景板的交点坐标为 $(X_{w1}, Y_{w1}, 0)$ 和 $(X_{w2}, Y_{w2}, 0)$, 将所需点的坐标转换到 A 相机坐标系下, A 相机的光心坐标为 $(0, 0)$ 。

$$\begin{bmatrix} X_{c1} \\ Y_{c1} \\ Z_{c1} \\ 1 \end{bmatrix} = \mathbf{R}_r \begin{bmatrix} X_{w1} \\ Y_{w1} \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} + \mathbf{T}_r \quad (19)$$

根据上述公式可以计算出左侧背景板上光线与背景板的交点坐标为 (X_{c1}, Y_{c1}, Z_{c1}) 因为2条光线在同一高度且都经过温度场的横截面, 所以计算交点坐标时可以把竖直方向上的坐标值省略即该交点坐标为 (X_{c1}, Z_{c1}) , \mathbf{R}_r 和 \mathbf{T}_r 为右相机坐标系与左侧背景板的世界坐标系的外参。

对于 B 相机的光心在 A 相机坐标系下的坐标值能够通过两个相机外参数据中的平移矩阵得出, 通过双目

标定得出左右相机的外参矩阵为 \mathbf{R} 和 \mathbf{T} , 其中 $\mathbf{T} = \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}$

那么 B 相机的光心在右侧相机坐标系下的坐标为 (X, Z) 。利用上一段中的方法能够求出在 B 相机坐标系下光线与右侧背景板的交点坐标为 (X_{c2}, Y_{c2}, Z_{c2}) , 2个相机的外参已知, 即:

$$\begin{bmatrix} X_{c3} \\ Y_{c3} \\ Z_{c3} \\ 1 \end{bmatrix} = \mathbf{R} \begin{bmatrix} X_{c2} \\ Y_{c2} \\ Z_{c2} \\ 1 \end{bmatrix} + \mathbf{T} \quad (20)$$

根据式(23)求得该点在 A 相机坐标系下的坐标为 (X_{c3}, Z_{c3}) 。至此, 4个点的坐标全都转换到 A 相机坐标系下, 分别为 $(0, 0)$, (X_{c1}, Z_{c1}) 和 (X, Z) , (X_{c3}, Z_{c3}) 。2条直线方程分别为:

$$z = \frac{Z_{c1}}{X_{c1}} x \quad (21)$$

$$z = \frac{Z_{C3} - Z}{X_{C3} - X}x - \frac{Z_{C3}X - ZX_{C3}}{X_{C3} - X} \quad (22)$$

2 条直线的交点坐标为:

$$\sqrt{\left(\frac{X_{C1}(Z_{C3}X - ZX_{C3})}{X_{C1}Z_{C3} - Z - Z_{C1}X_{C3} + Z_{C1}X}, \frac{Z_{C1}(Z_{C3}X - ZX_{C3})}{X_{C1}Z_{C3} - Z - Z_{C1}X_{C3} + Z_{C1}X} \right)} \quad (23)$$

该坐标即为温度场中心坐标。那么,相机距离温度场中心的距离为:

$$M = \sqrt{\left(\frac{X_{C1}(Z_{C3}X - ZX_{C3})}{X_{C1}Z_{C3} - Z - Z_{C1}X_{C3} + Z_{C1}X} \right)^2 + \left(\frac{Z_{C1}(Z_{C3}X - ZX_{C3})}{X_{C1}Z_{C3} - Z - Z_{C1}X_{C3} + Z_{C1}X} \right)^2} \quad (24)$$

将求得的 M 值代入式(5)求得偏折角,再将偏折角的值代入式(2)求得待测流场的折射率分布,最后根据式(7)可解算温度场。

3 实验验证

实验所使用的工业相机的像素为 500 万 pixel,镜头的焦距为 16 mm,实验用的背景点为 Matlab 生成的随机点,环境折射率为 1.000 273。实验系统如图 7 所示。

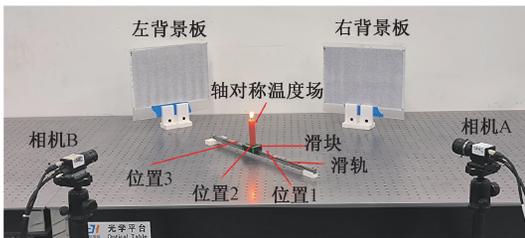


图 7 实验场景图

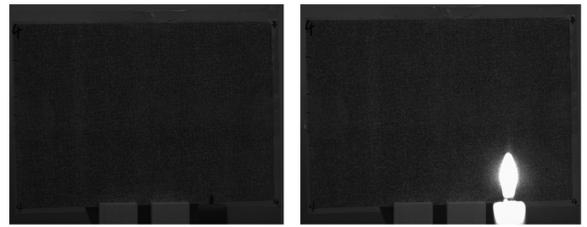
Fig. 7 Experimental scene diagram

对实验采取的图片使用 PIV 处理软件(PIVLab)来对有无火焰的 2 幅图像进行相关性分析。图 8 和 9 分别为左右两个相机拍摄的有无火焰的原始图像。处理时选择适当大小的迭代窗口尺寸,本文实验中采用了 16 pixel×16 pixel 的迭代窗口,水平和垂直迭代间距都为 8 pixel。

图 10 为图像处理的结果,图中小箭头长度代表偏移量的大小。图为某一高度上的偏移量的大小,根据轴对称温度场的性质,很容易找出位于温度场中心的点,找到对应点的位置该点的像素坐标也就的出来了。

根据第 3 节中的方法,将温度场在此位置时所需的 4 个点在 A 相机坐标系中的坐标值结算出来。

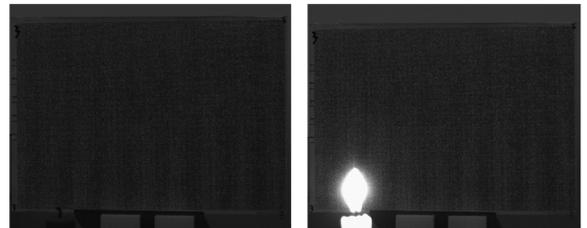
首先对两个相机进行标定,标定方法为张正友棋盘格标定法,棋盘格黑白方框长度为 10 mm,将棋盘格放置在两个相机的都能拍到的区域,在此区域中不断调整棋盘格的位置,每个位置拍一组,左右相机各拍 20 组图像,



(a) 未加温度场 (b) 加温度场
(a) Without temperature field (b) With temperature field

图 8 左相机拍摄原始图像

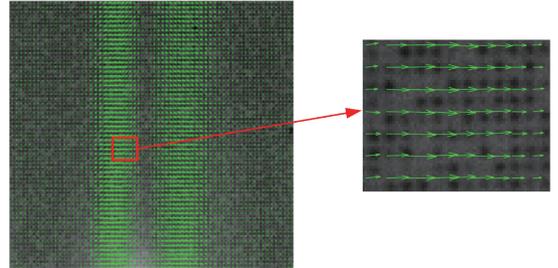
Fig. 8 The original image taken by the left camera



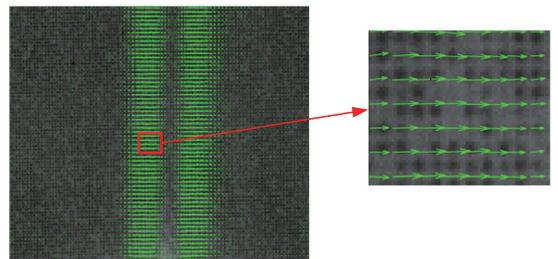
(a) 未加温度场 (b) 加温度场
(a) Without temperature field (b) With temperature field

图 9 右相机拍摄原始图像

Fig. 9 The original image taken by the right camera



(a) 左相机图像处理结果
(a) Left camera processing result



(b) 右相机图像处理结果
(b) Right camera processing result

图 10 PIV 粒子偏移图像处理

Fig. 10 PIV particle offset image processing

标定示意图如图 11 所示。然后使用 MATLAB 中的 Stereo Camera Calibrator 工具箱进行标定,结果显示双目标定的总的平均重投影误差小于 0.1 pixel,标定结果满足误差条件。

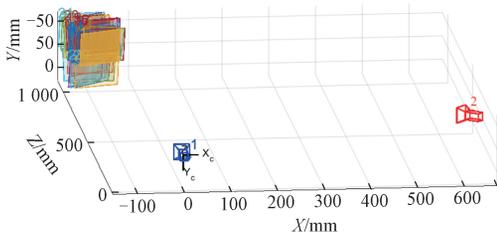


图 11 双目标定的示意图

Fig. 11 Binocular calibration diagram

根据双目标定的结果导出的数据能够得出左右两侧相机的内参矩阵分别为:

$$K_l = \begin{bmatrix} 7\ 350.882 & 0.640 & 1\ 281.296 \\ 0 & 7\ 345.556 & 1\ 046.557 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$K_r = \begin{bmatrix} 7\ 404.481 & 1.546 & 1\ 275.792 \\ 0 & 7\ 396.068 & 1\ 023.186 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

2 个相机之间的位置关系为:

$$R = \begin{bmatrix} 0.656 & -0.014 & 0.754 \\ 0.005 & 1.000 & 0.014 \\ -0.754 & -0.006 & 0.656 \end{bmatrix}, T = \begin{bmatrix} -649.95 \\ -1.14 \\ 300.30 \end{bmatrix}$$

R 为旋转矩阵, T 为平移矩阵, 单位为 mm。

如图 12 所示, 背景板左上角和 2 个相机的光心分别为世界坐标系的原点和相机坐标系的原点, 在每个背景板上选取 6 个点为特征点。

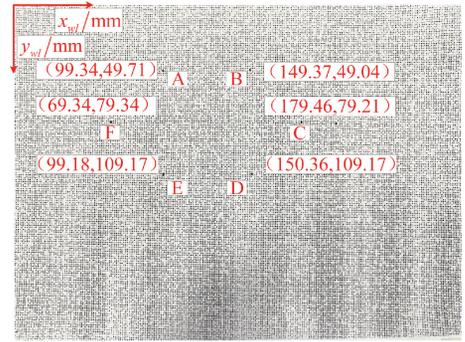
为保证温度场中心测量精度, 特征点的坐标必须保证一定的精确性, 以避免该测量误差通过误差传递影响最终的测量精度。如图 13 所示, 实验采用高精度影像仪来测量特征点坐标, 影像仪型号为 VMS-3020, 仪器的 XY 轴的行程是 300 mm×200 mm, 调焦行程为 160 mm, 测量误差为: $X/Y \leq (3+L) \mu\text{m}$ 。

根据 PnP 算法解出的左右两侧相机的相机坐标系与对应背景板之间位姿关系为:

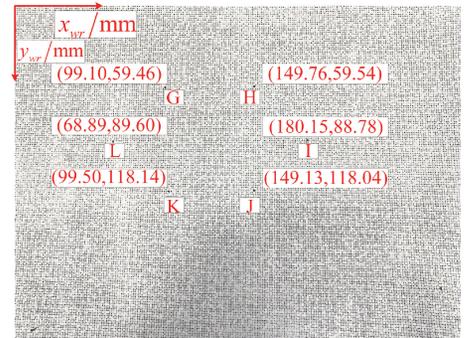
$$R_l = \begin{bmatrix} 0.999 & 0.015\ 9 & -0.047 \\ -0.024 & 0.986 & -0.166 \\ 0.044\ 0 & 0.167 & 0.985 \end{bmatrix}, T_l = \begin{bmatrix} -164.25 \\ -83.08 \\ 1\ 181.92 \end{bmatrix}$$

$$R_r = \begin{bmatrix} 0.997 & 0.008 & -0.079 \\ -0.004 & 0.998 & 0.062 \\ 0.080 & -0.061 & 0.995 \end{bmatrix}, T_r = \begin{bmatrix} -160.04 \\ -73.90 \\ 1\ 222.29 \end{bmatrix}$$

根据实验所得出的数据以及第 3 节中的方法, 解算出当前温度场位置在 A 相机坐标系下的中心坐标为 (-65.93, 761.76) 单位是 mm, 利用两点间的距离公式计算出温度场中心到右相机的距离和温度场中心到背景板的距离分别为 764.66 和 457.62 mm, 根据第 2 节的公式计算出温度场如图 14 所示。



(a) 左侧背景板
(a) Left background panel



(b) 右侧背景板
(b) Right background panel

图 12 背景板上特征点的分布

Fig. 12 Distribution of feature points on the background plate



图 13 影像仪测距示意图

Fig. 13 Schematic diagram of imager ranging

此外, 实验时采用热电偶的测量值当作温度场的真实值, 将蜡烛于安装三坐标仪的光学平台上, 三坐标仪用于精准的控制热电偶的位置如图 15 所示。

热电偶选用 KPS-IN600 铠装热电偶, 测量 6 点位, 这 6 个点位距离温度场中心位置分别为 0、1、2、3、4、5 mm。最终的测量结果如图 16 所示。

实验结果显示对于相同温度场进行测量, 纹影定量测温法计算得到的温度结果与热电偶测量值基本保持一致, 以热电偶测得的温度值为标准, 则纹影定量测温法的

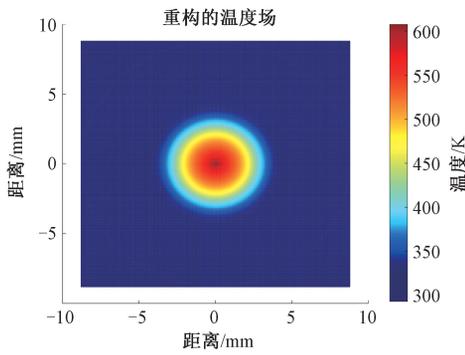


图 14 温度场中心在(-65.93,761.76)时的温度场分布

Fig. 14 Temperature field distribution at the temperature field center (-65.93,761.76)

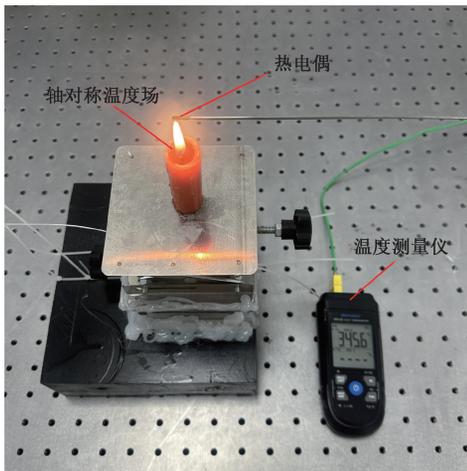


图 15 热电偶测温实验

Fig. 15 Thermocouple temperature test diagram

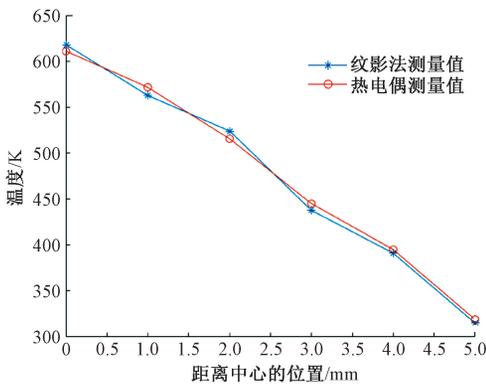


图 16 纹影法与热电偶测量的温度对比

Fig. 16 Comparison of temperature measured by the Schlieren method and thermocouple

平均温度的最大误差为 9.04℃,说明了背景纹影法测量温度场的准确性。

用同样的方法,将温度场的位置变换两次,每次变换 5 mm 的距离,利用第 3 章的方法求出的温度场中心坐标分别为 (-65.40,765.97) 和 (-65.95,770.97),从结果上来看,温度场中心位置偏移的误差对重构精度的影响在可接受的范围内。

以初始的位置即温度场中心在 (-65.93,761.76) 时为真实值,计算另外 2 个位置重构出的温度场与其误差,图 17 为温度场中心位置在 (-65.40,765.97) 处重构结果与初始位置重构结果的误差。

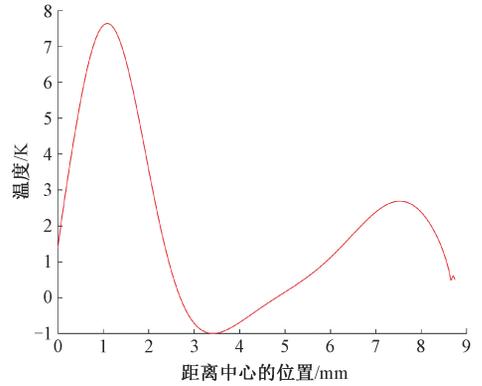


图 17 位置 2 与位置 1 的误差

Fig. 17 Error between position 2 and position 1

图 18 为温度场中心位置在 (-65.95,770.97) 处重构结果与初始位置重构结果的误差。

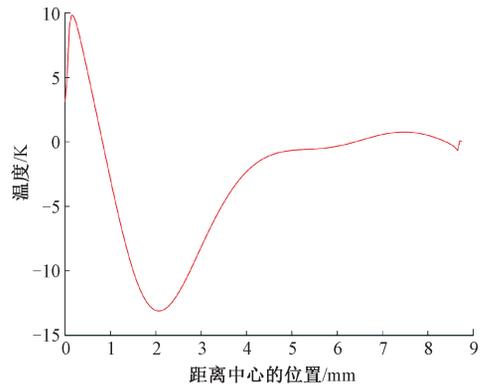


图 18 位置 3 与位置 1 的误差

Fig. 18 Error between position 3 and position 1

综上,双目 BOS 测量系统能够重构出未知位置的温度场,理论上来说同一温度场在不同位置上测量结果是不变的。但是,实验表明不同位置上测量的温度场的结果仍存在差异,造成这样的问题的原因可能是受实验环境的影响,处理数据时对偏折角的拟合也会产生一些误差,对最终的结果也会产生影响。

4 结 论

本文对轴对称温度场的重构以及温度场中心偏移对轴对称温度场重构进行了仿真实验,通过与原始温度场比较得知温度场中心的偏移会导致重构温度场的误差变大。建立双目 BOS 测量系统,通过理论分析利用 PnP 算法以及双目相机的标定能够确定通过温度场中心的 2 条光线,并求出这 2 条光线的交点,交点就是温度场的中心,然后利用 Abel 逆变换等公式进行温度场的重构,最后通过实验来验证了这一方法的可行性。

参考文献

- [1] 徐雪. 基于纹影法的金属桥箔发火温度场测试及重建[D]. 西安工业大学, 2023.
XU X. Test and reconstruction of ignition temperature field of metal bridge foil based on Schlieren method[D]. Xi'an Technological University, 2023.
- [2] 莫苏新. 基于 CCD 的高温温度场测量方法研究[D]. 长春理工大学, 2020.
MO S X. Research on high temperature field measurement method based on CCD [D]. Changchun University of Science and Technology, 2020.
- [3] RABBANI G, AHMAD E, AHMAD A, et al. Structural features, temperature adaptation and industrial applications of microbial lipases from psychrophilic, mesophilic and thermophilic origins [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2023, 225: 822-839.
- [4] 王旭. 基于 CCD 图像的二维温度场重建方法研究[D]. 北京化工大学, 2022.
WANG X. Research on two-dimensional temperature field reconstruction method based on CCD image[D]. Beijing University of Chemical Technology, 2022.
- [5] OMRANE A, PETERSSON P, ALDÉN M, et al. Simultaneous 2D flow velocity and gas temperature measurements using thermographic phosphors[J]. Journal of Applied Physics B, 2008, 92: 99-102.
- [6] 张天宇, 吴嘉雯, 方弘毅, 等. 复杂背景下三维弯曲表面红外测温修正[J]. 仪器仪表学报, 2023, 44 (5): 184-192.
ZHANG T Y, WU J W, FANG H Y, et al. Infrared temperature measurement correction for three dimensional curved surface under complex background[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2023, 44 (5): 184-192.
- [7] 杨玉强, 张钰颖, 高佳乐, 等. 一阶光学游标效应的全

光纤温度传感器[J]. 电子测量与仪器学报, 2024, 38 (4): 234-240.

YANG Y Q, ZHANG Y Y, GAO J L, et al. All-fiber temperature sensor with first-order optical vernier effect[J]. Chinese Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2024, 38 (4): 234-240.

- [8] 陈相洪, 史凡萍, 杨鹏, 等. 基于高精度数字温度传感器测试系统及建模仿真[J]. 电子测量与仪器学报, 2023, 37 (7): 42-52.

CHEN X H, SHI F P, YANG P, et al. Test system and modeling simulation based on high precision digital temperature sensor[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrument, 2023, 37 (7): 42-52.

- [9] SETTLES G S. Schlieren and shadowgraph techniques[M]. Springer, Berlin, Heidelberg and New York, 2001:1-24.

- [10] 李佳明, 胡春波, 张胜敏, 等. 固体发动机喷管喉衬温度场测量与分析[J]. 实验流体力学, 2012, 26(5): 57-60.

LI J M, HU CH B, ZHANG SH M, et al. Measurement and analysis of temperature field of nozzle throat liner of solid motor [J]. Experimental Fluid Mechanics, 2012, 26(5):57-60.

- [11] 于之靖, 李雁玲, 郑建文, 等. 采用纹影法的微型航空发动机尾喷温度场测量方法[J]. 光学技术, 2020, 46 (4): 420-426.

YU ZH J, LI Y L, ZHENG J W, et al. The temperature field measurement method by using Schlieren method for micro aero-engine [J]. Optical Technique, 2020, 46 (4): 420-426.

- [12] 王印松, 谢蕊馨, 孔庆梅, 等. 基于 TDLAS 的 CO 检测系统调制参数优化与温度补偿[J]. 光学技术, 2024, 50 (1): 81-87.

WANG Y S, XIE R X, KONG Q M, et al. Modulation parameter optimization and temperature compensation of CO detection system based on TDLAS [J]. Optical Technique, 2024, 50 (1): 81-87.

- [13] 王婷, 韩志洋, 俞跃, 等. 基于 TDLAS 技术气体浓度测量的温度修正方法[J]. 激光与红外, 2024, 54 (2): 208-213.

WANG T, HAN ZH Y, YU Y, et al. Temperature correction method for gas concentration measurement based on TDLAS technology [J]. Laser & Infrared, 2024, 54 (2): 208-213.

- [14] 王鑫,孙远. 冷原子温度测量方法的研究进展[J]. 仪器仪表学报, 2023, 44 (9): 70-82.
WANG X, SUN Y. Research progress of cold atom temperature measurement methods[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2023, 44 (9): 70-82.
- [15] 黄训铭,谢爱民,郑蕾,等. 聚焦纹影图像密度场处理技术[J]. 四川兵工学报,2015,36(6):77-81.
HUANG X M, XIE AI M, ZHENG L, et al. Technique research of focusing Schlieren images processing for getting flow density[J]. Sichuan Ordnance Engineering Journal,2015,36(6):77-81.
- [16] GOLDHAHN E, SEUME J. The background oriented Schlieren technique: Sensitivity, accuracy, resolution and application to a three-dimensional density field[C]. 13th International Symposium on Application of Laser Techniques to Fluid Mechanics, Experiments in Fluids, 2007, 43(2/3): 241-249.
- [17] CONTRERAS V, MARZO A. Adjusting single-axis acoustic levitators in real time using rainbow Schlieren deflectometry [J]. Review of Scientific Instruments, 2021, 92(1):015107.
- [18] ALVAREZ-HERRERA C, MORENO-HERNANDEZ D, BARRIENTOS-GARCIA B. Temperature measurement of an axisymmetric flame by using a Schlieren system[J]. Journal of Optics A: Pure and Applied Optics, 2008, 10(10): 104014.
- [19] RICHARD H, RAFFEL M. Principle and applications of the background oriented Schlieren (BOS) method[J]. Measurement Science and Technology, 2001, 12 (9): 1576-1585.
- [20] RICHARD H, RAFFEL M, REIN M, et al. Demonstration of the applicability of a background oriented Schlieren (BOS) method [C]. 10th International Symposium on Applications of Laser Techniques to Fluid Mechanics, 2002: 145-156.
- [21] CAKIR B O, LAVAGNOLI S, SARACOGLU B H, et al. Sensitivity and resolution response of optical flow-based background-oriented Schlieren to speckle patterns [J]. Measurement Science and Technology, 2024, 35 (7): 075201.
- [22] 蔡华俊,宋咏,曹政,等. 基于背景纹影技术的三维瞬态密度场重建[J]. 气动研究与试验, 2023, 1 (6): 79-91.
CAI H J, SONG Y, CAO ZH, et al. Three-dimensional transient density field reconstruction based on background Schlieren technique [J]. Pneumatics Research and Tests, 2023, 1 (6): 79-91.
- [23] 张彪,李智豪,李健,等. 基于背景导向纹影的火焰三维温度场重建[J]. 工程热物理学报, 2023, 44 (1): 158-161.
ZHANG B, LI ZH H, LI J, et al. Three-dimensional flame temperature field reconstruction based on background oriented Schlieren [J]. Chinese Journal of Engineering Thermophysics, 2023, 44 (1): 158-161.

作者简介



吴军(通信作者),2009年于天津大学获得学士学位,2011年于天津大学获得硕士学位,2014年于天津大学获得博士学位,现为中国民航大学教授,主要研究方向为激光与视觉检测技术。

E-mail: wujuncauc@163.com

Wu Jun (Corresponding author) received his B.Sc. degree from Tianjin University in 2009, received his M. Sc. degree from Tianjin University in 2011, and received his Ph. D. degree from Tianjin University in 2014. He is currently a professor at Civil Aviation University of China. His main research interests include laser and visual inspection technology.



郭润夏,2003年于空军工程大学获得学士学位,2008年于中国民航大学获得硕士学位,2012年于天津大学获得博士学位,现为中国民航大学教授,主要研究方向为飞机关键部件故障诊断与剩余寿命预测技术。

E-mail: rxguoblp@163.com

Guo Runxia received his B.Sc. degree from Air force Engineering University in 2003, received his M. Sc. degree from Civil Aviation University of China in 2008, and received his Ph. D. degree from Tianjin University in 2012. He is currently a professor at Civil Aviation University of China. His main research interests include fault diagnosis and remaining life prediction technology of aircraft key components.