

DOI: 10.13382/j.jemi.B2205447

运用光线追迹算法的高温物体视觉三维测量*

万杰¹ 张进^{1,2} 刘远航¹ 夏豪杰^{1,2} 王君¹

(1. 合肥工业大学仪器科学与光电工程学院测量理论与精密仪器安徽省重点实验室 合肥 230009;
2. 安全关键工业测控技术教育部工程研究中心 合肥 230009)

摘要:对于高温下的视觉三维测量,如何削弱高温辐射以及成像畸变对构件测量产生的影响,在航空航天和汽车制造等领域具有极其重要的意义。基于黑体辐射理论分析了物体在不同温度下的辐射特性,确定了成像光谱范围,建立了高温双目立体视觉测量模型,运用有限元建模仿真与光线追迹算法相结合的方法分析光线在高温场中传播的偏折规律,并分析了温度和光线波长对光线偏折量的影响。最后,通过搭建双目立体视觉测量系统,使用 CMOS 相机、窄带滤光片和平行光源组成的测量系统削弱高温辐射光的干扰,对分析结果进行实验验证。实验结果表明,测量系统能够在高温下获得清晰的图像特征;光线追迹算法分析的结果和实验数据有很好的 consistency;相较于常温测量结果,800 °C 以下视觉测量结果的误差小于 0.28 mm,球间距测量标准差小于 0.11 mm,能够满足构件在高温环境下的测量需求。

关键词: 高温测量;光线追迹;立体视觉;梯度折射率

中图分类号: TP391.4;TB96 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 460.4

Visual three-dimensional measurement of high temperature object using light tracing algorithm

Wan Jie¹ Zhang Jin^{1,2} Liu Yuanhang¹ Xia Haojie^{1,2} Wang Jun¹

(1. Anhui Province Key Laboratory of Measuring Theory and Precision Instrument, School of Instrument Science and Optoelectronics Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China; 2. Engineering Research Center of Safety Critical Industrial Measurement and Control Technology, Ministry of Education, Hefei 230009, China)

Abstract: How to weaken the influence of high temperature radiation and imaging distortion on component measurement is of great significance in aerospace and automobile manufacturing. In this paper, the radiation characteristics of the object at different temperatures are analyzed based on the blackbody radiation theory, and the imaging spectral range is determined. The high temperature binocular stereo vision measurement model is established. The deflection law of light propagation in the high temperature field is analyzed by combining the finite element modeling simulation and the ray tracing algorithm, and the influence of temperature and light wavelength on the deflection of light is analyzed. Finally, through the establishment of binocular stereo vision measurement system, the interference of high-temperature radiation light is weakened by the measurement system composed of CMOS camera, narrow-band filter and parallel light source, and the analysis results are experimentally verified. The experimental results show that the measurement system can obtain clear image features at high temperature. The results of ray tracing algorithm analysis are in good agreement with the experimental data; compared with the normal temperature measurement results, the error of visual measurement results under 800 °C is less than 0.28 mm, and the standard deviation of ball spacing measurement is less than 0.11 mm, which can meet the measurement requirements of components in high temperature environment.

Keywords: high temperature measurement; light tracing; stereo vision; graded index

收稿日期: 2022-05-03 Received Date: 2022-05-03

* 基金项目: 国家自然科学基金(52175504,51927811)、中央高校基本科研业务费专项(PA2021KCPY0027,PA2021GDGP0061)项目资助

0 引言

在航空航天、汽车制造等机械工业领域中,构件在热态下的测量对改善制造工艺、提高加工精度和生产效率等方面都具有重要的经济价值和科学意义^[1],如热轧构件的几何测量、航空发动机动态测试等工业测量领域,需要在高温场内进行精确测量与控制。视觉测量技术具有的非接触、准确、高效的特点,使其在复杂环境下的工业测量领域中有很好的应用前景^[2-3]。但是在高温场景中进行测量时,高温物体和空气之间的热传递导致空气温度上升,双目立体视觉的几何成像模型发生改变,同时高温产生的辐射光会造成图像边缘模糊^[4]。在高温环境中,传统的双目立体视觉测量技术的成像效果会受到较大影响。目前,大多采用数字滤光和物理滤光^[5]的方法减少高温辐射光的影响,再通过图像处理算法来增强图像的边缘特征^[6-7]。然而,光线在经过高温空气场时会产生不同程度的折射,导致相机获取的图像产生畸变,最终影响视觉测量的精度^[8]。因此,探究高温环境下视觉测量精度的提升方法具有重要意义。

由介质折射率分布不均导致的光线偏折的补偿方法已成为高温视觉测量技术一个研究热点^[9]。吴军等^[10]探讨了光线经过高温梯度环境所产生的成像畸变问题,并对温度场外的棋盘格进行测量验证,由于没有考虑到高温辐射光的影响,该方法并不适用于高温场内的视觉测量。代少升等^[11]通过研究红外焦平面阵列响应输出随环境温度变化的补偿模型,实现了对红外热成像畸变的修正与补偿,但是该方法需要对大量数据进行分析,而且过程复杂。韩燕等^[12]分析了新疆戈壁大气参数,对该地区的大气对光传播折射效应进行修正,但该方法主要适用于空间大尺度、区域固定的测量补偿,不适用于中短距离的温度场。

本文基于高温下黑体的辐射特性,利用光谱选择法来消除辐射光的干扰。然后,建立了高温双目立体视觉测量模型,运用有限元建模仿真与光线追迹算法相结合的方法分析光线在高温场中的偏折规律,分别研究了温度、光线波长与光线偏折量的对应关系。最后,搭建高温双目立体视觉测量系统进行实验验证。实验结果表明,本文方法在 800 °C 以下能够采集到清晰构件图像,并且较为准确的测量出球形构件之间的距离。

1 测量模型与原理

1.1 高温视觉测量成像波段的选择

高温场中构件会产生大量的辐射光干扰成像过程,针对这一问题需要对高温构件热辐射特性进行研究,从

而制定出图像采集的方法,减弱干扰光谱对图像质量的影响。普朗克黑体辐射定律公式为:

$$M_{\lambda} = \frac{2\pi c^2 h}{\lambda^5} \cdot \frac{1}{e^{\frac{hc}{\lambda kT}} - 1} \quad (1)$$

式中: λ 为波长, T 为黑体的温度, h 为普朗克常数, k 为玻尔兹曼常数, c 为真空中光速。根据式(1)绘制不同温度下的光谱辐射出射度,如图 1 所示。从黑体的辐射出射度的曲线变化规律可以得出: 800 °C 以下辐射光谱波段为红光以及近红外光,随着温度的升高,辐射出的光波波长向短波长区间增加,黑体的辐射能量也逐渐增加;在可见光波段内的黑体辐射能量较少,同时辐射的能量是随着波长的减小而减弱的。

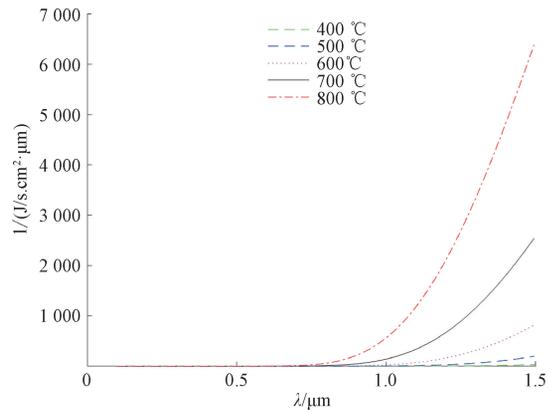


图 1 黑体在不同温度下的辐射强度

Fig. 1 Radiation intensity of black body at different temperatures

因此,使用短波通滤光片对高温物体进行光谱选择性图像采集,让一部分短波长范围的可见光通过,截止辐射能量较强的长波长范围的光线,削弱了高温产生的辐射光对成像质量的影响。此外,根据图 2 所示相机的光谱响应曲线,450 ~ 700 nm 之间的谱段下相机响应度在 50% 以上,因此选取上述谱段进行图像采集。

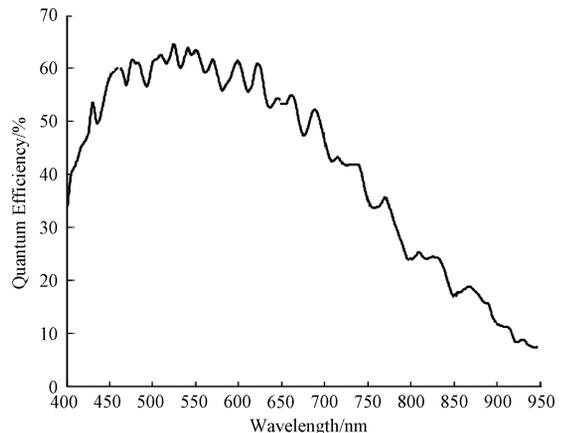


图 2 实验相机光谱响应

Fig. 2 Spectral response of experimental camera

1.2 高温双目立体视觉测量模型

介质的组分、温度的非均匀性会导致介质折射率的非均匀分布,对于变折射率的介质,光线传播的轨迹不再是直线,而是向高折射率的区域发生偏折,成像模型发生变化。为了描述高温下的成像模型,需要求解空间内的空气场内折射率分布。对于可见光和近红外光波段无法精确测量各种大气物理量时,为了简便计算,选择了最常用 Rueger 模型^[13],其计算方法如下:

$$N_s = (n_s - 1) \times 10^6 = 287.6155 + \frac{1.62887}{\lambda^2} + \frac{0.01360}{\lambda^4} \quad (2)$$

$$N(q) = (n(q) - 1) \times 10^6 = \left(\frac{273.15}{1013.25} \cdot \frac{P}{T(q)} \cdot N_s \right) - 11.27 \frac{e}{T(q)} \quad (3)$$

式中: N_s 大气折射度, n_s 为大气折射率, $N(q)$ 为实际折射度, $n(q)$ 为实际折射率,气压 P 的单位为 hPa,波长 λ 单位为 μm , $T(q)$ 温度单位为 K, e 为水汽压强。在近地理想空间下,大气压 $P = 1013.25$ hPa;高温导致空气干燥,故水汽压值为 0。绘制温度、光线波长与空气折射率的关系,如图 3 所示,在不同波长下空气折射率整体的变化的趋势是一致的,但光线波长较长时,折射率变化的幅度较小;此外,空气折射率与温度之间的关系为负相关。

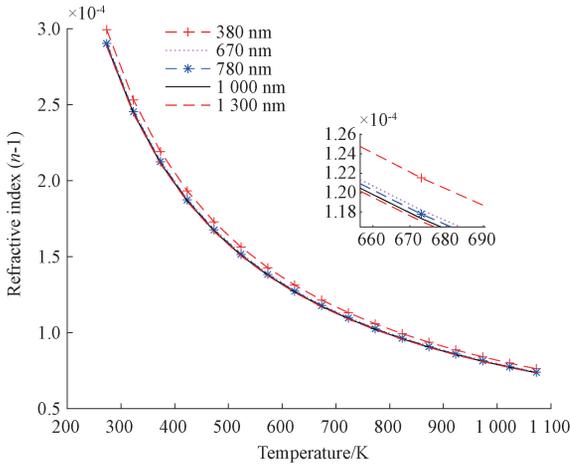


图 3 空气温度、光线波长与空气折射率关系
Fig. 3 Relationship between air temperature, light wavelength and air refractive index

根据温度折射率分布规律建立高温双目立体视觉成像模型,如图 4 所示。空气折射率恒定时,物点 P 发出的光线沿着实心线传播到相机光心 O_1 、 O_2 并与像平面分别相交与点 $l_1(u_{l1}, v_{l1})$ 和 $r_1(u_{r1}, v_{r1})$ 。在不均匀空气温度场下,空气折射率发生变化导致光线不再沿着直线到达

相机光心,而是沿着曲线路径,如点曲线表示。相机接收的光线实际是光线弯曲后的切线,如长虚线表示,与像平面的交点分别为 $l_1^*(u_{l2}, v_{l2})$ 和 $r_1^*(u_{r2}, v_{r2})$,此时两相机像素坐标进行重建得到点 P^* 。当在不均匀空气温度场下得到的点 P 和 P^* 之间的空间距离,即高温影响下的空间位置误差,为了提高成像精度,需要对高温下的像素坐标进行修正。

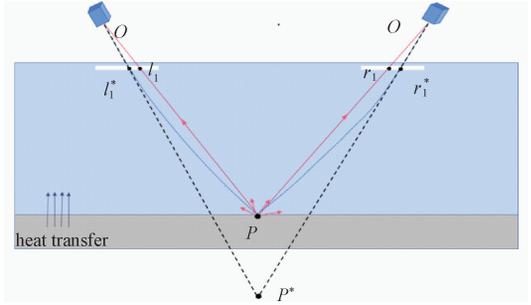


图 4 高温双目立体视觉成像模型
Fig. 4 High-temperature binocular stereo vision imaging model

本文通过搭建双目立体视觉测量系统来获取空间中目标的三维坐标^[14-15]。该系统主要由两个相机和光源组成。测量时,使用两个相机同时对被测物体进行拍摄。空间点的成像位置可以近似用针孔成像模型来表示,该模型主要描述了相机图像二维坐标系下的像素点到世界坐标系下三维坐标点的映射关系,具体转换公式为:

$$s \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \alpha_x & 0 & u_0 & 0 \\ 0 & \alpha_y & v_0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{R} & \mathbf{t} \\ \mathbf{0}^T & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \\ 1 \end{bmatrix} = \mathbf{K}_1 \mathbf{K}_2 \mathbf{X} \quad (4)$$

式中: s 为比例因子, $[u, v, 1]^T$ 是二维图像点在图像坐标系下的齐次坐标; \mathbf{K}_1 为相机的内部参数矩阵,包含图像坐标系 u 轴和 v 轴方向的尺度因子 α_x 和 α_y ,以及主点像素坐标 (u_0, v_0) ; \mathbf{K}_2 为测量系统的外部参数矩阵,包括世界坐标系到相机坐标系的旋转矩阵 \mathbf{R} 和平移向量 \mathbf{t} ; \mathbf{X} 为空间点的齐次三维坐标 $[X_w, Y_w, Z_w, 1]^T$ 。

根据高温双目立体视觉成像模型,空间点 P 在两相机的图像坐标分别为点 $l_1(u_{l1}, v_{l1})$ 和 $r_1(u_{r1}, v_{r1})$,根据式(4)可得:

$$\begin{cases} s_l [u_{l1} & v_{l1} & 1]^T = \mathbf{K}_{1l} \mathbf{K}_{2l} \mathbf{X} \\ s_r [u_{r1} & v_{r1} & 1]^T = \mathbf{K}_{1r} \mathbf{K}_{2r} \mathbf{X} \end{cases} \quad (5)$$

因此,根据式(5)对图像中待测物点进行特征提取、匹配,再根据标定的两相机内、外参数,就能重建出物点的空间三维坐标。

1.3 光线追迹算法原理

针对高温内的物点成像偏移问题,应用光线追迹算

法求解高温场内光线传播路径,如图 5 所示,将变折射率介质用折射率等值线分成多个区域,每个区域内部可近似看作均匀介质,光线仅在各个区域的等值线上发生折射。应用微分的原理,当相邻折射等值线的差值趋于 0 时就能得到近似的光线轨迹^[16]。

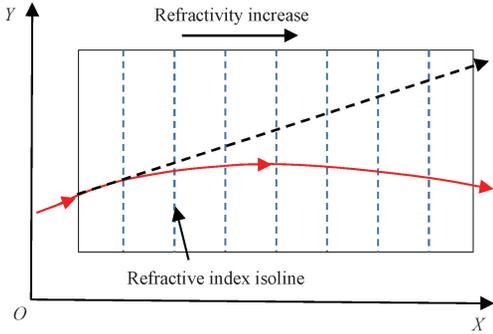


图 5 光线追迹算法原理示意图

Fig. 5 Principle diagram of ray tracing algorithm

空间中光源在某一方向上发出的光线为谐波,即光线上每点振动是随着时间而变化的谐函数,其数学表达式为:

$$f = A \cos(\mathbf{k} \cdot \mathbf{q} - \omega t + \varphi) \quad (6)$$

式中: \mathbf{k} 是波矢量,大小为 $2\pi/\lambda$,方向为光波传播方向。 \mathbf{q} 是位置矢量, ω 是角频率, φ 是初始的相移。

由式(6)可知,光波在三维空间中的传播相位的表达式为:

$$\theta = \mathbf{k} \cdot \mathbf{q} - \omega t + \varphi \quad (7)$$

在各向同性介质中,式(7)中波矢量和角频率的数学关系为:

$$\omega = \frac{2\pi}{T} = 2\pi \cdot \left(\frac{v}{\lambda}\right) = \frac{2\pi}{\lambda} \cdot \frac{c}{n(\mathbf{q})} = \frac{c|\mathbf{k}|}{n(\mathbf{q})} \quad (8)$$

式中: $n(\mathbf{q})$ 是介质的折射率, c 为真空中光速, v 为介质中光速。

对式(7)求偏导,得到的波矢量和角频率用相位来表示:

$$\mathbf{k} = \frac{\partial \theta}{\partial \mathbf{q}} \quad (9)$$

$$\omega = -\frac{\partial \theta}{\partial t} \quad (10)$$

对式(9)和(10)分别对时间 t 求导,得到方程为:

$$\frac{d\mathbf{k}}{dt} = \frac{d}{dt} \frac{\partial \theta}{\partial \mathbf{q}} = -\frac{\partial \omega}{\partial \mathbf{q}} \quad (11)$$

$$\frac{d\mathbf{q}}{dt} = \mathbf{v} = \frac{\partial \omega}{\partial \mathbf{k}} \quad (12)$$

通过离散的方法进行数值计算求解空间中波矢 \mathbf{k} 和位矢 \mathbf{q} 分量的 6 个耦合一阶常微分方程,将计算结果多次迭代可以得到光线在传播路径上的多个坐标点,再将

多个坐标点相互连接形成光线传播的轨迹。

2 仿真计算

2.1 高温场模型构建

在室温状态下对两相机进行标定,得到两相机的内外参数以及两个相机的光心位置。利用左相机光心作为仿真模型的世界坐标系原点,对实验环境进行建模仿真,如图 6 所示。使用三维重建算法计算常温下炉口 4 个角点和 4 个球的球心空间坐标作为仿真中的空间位置参数,按照箱式电阻炉炉膛空间(尺寸为 $200 \text{ mm} \times 100 \text{ mm} \times 300 \text{ mm}$)作为仿真恒温热源区域。设定初始温度 $50 \text{ }^\circ\text{C}$,之后温度每升高 $50 \text{ }^\circ\text{C}$ 进行一次仿真运算,直至温度到达实验极限温度 $800 \text{ }^\circ\text{C}$,炉口处边长为 1000 mm 的立方体空气场为传热研究区域,模型中空气场方形边界为开放边界,且对区域内的空气无约束作用。

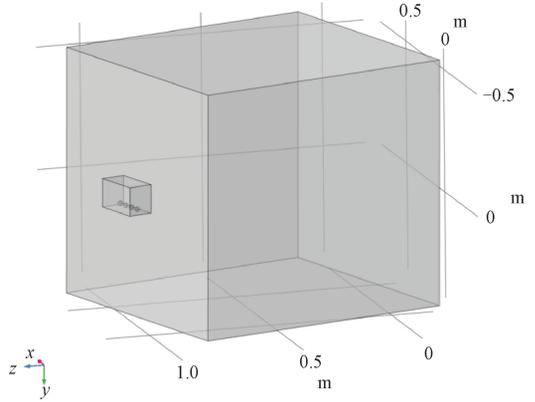


图 6 仿真几何模型

Fig. 6 Simulation geometry model

本文使用 3 节点三角形对模型进行网格剖分,如图 7 所示,三角形单元对几何轮廓有较强的适应能力,可以通过增加三角形网格数量来逼近几何边界^[17]。

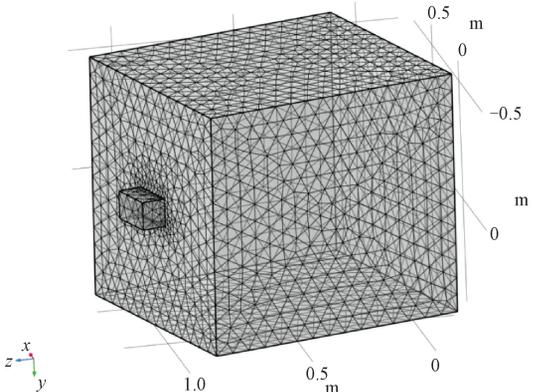


图 7 网络剖分图

Fig. 7 Mesh subdivision

2.2 仿真结果与分析

在室内环境中没有明显的气流,且热源面高度仅为 100 mm,因此没有详细讨论热对流对成像的影响。此外,在高温环境下,空气几乎没有反射能力,可以看作透热体,因此热辐射对空气温度的影响可以忽略不计。从热传导方面分析计算空气场内的温度变化,在热源温度 50 ℃~800 ℃ 下设定了 16 个温度值进行计算,以极限温度 800 ℃ 的计算结果为例,如图 8 所示。

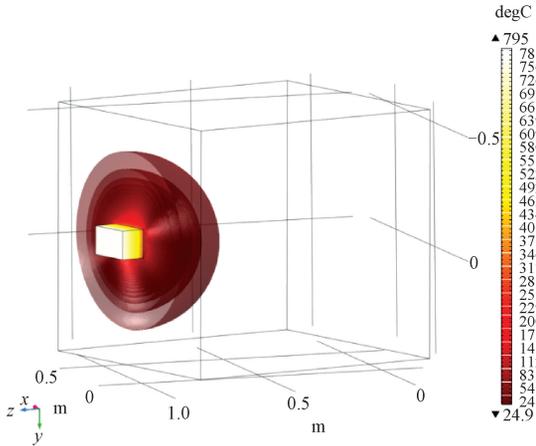


图 8 10 min 时炉口空气场温度分布
Fig. 8 Temperature distribution of furnace outlet air field in 10 min

仿真时,1 m×1 m 空气域内到热源表面不同距离的空气温度变化如图 9 所示。距离热源表面 200 mm 的空气中的温度传热过程中温度升高较快,传热仿真的 10 min 内该点的温度值随着传热时间的增长而线性增加,最终达到 339.3 K。300 mm 处的空气温度升高的趋势明显弱于 200 mm 处的空气温升速率,10 min 后此处温度为 304.9 K。而距离热源表面 400 mm 远的空气在开始的 5 min 内温度变化很小,5 min 后温度才开始缓慢增加,最后在传热 10 min 时温度升至 295.5 K。随着传热时间的增加,该处空气的温度上升的趋势逐渐平缓直至不再变化。距离热源距离为 500 和 600 mm 处空气基本不受热源的传热影响,10 min 后,这两处的温度上升小于 1 K,此时空气场的温度趋于室温。热源温度 800 ℃,传热 10 min 后空气温度场趋于稳定,距离炉口 500 mm 以外空气温度接近室温。再对该场域内空气折射率进行耦合计算,结果如图 10 所示。

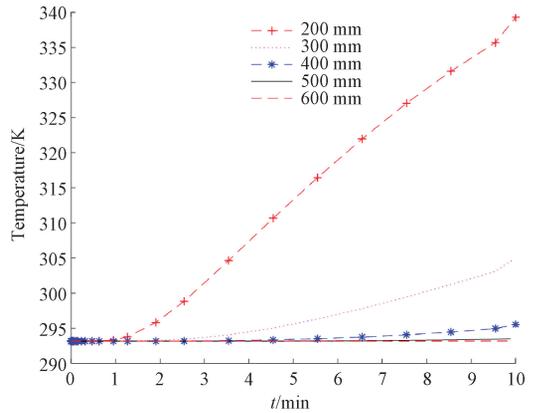


图 9 空气场中不同位置温度变化情况
Fig. 9 Temperature changes at different positions in the air field

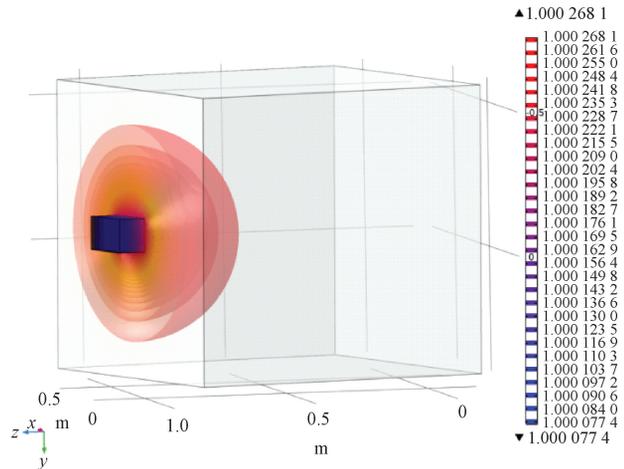


图 10 10 min 时炉口空气场折射率分布
Fig. 10 Field refractive index of furnace at 10 minutes

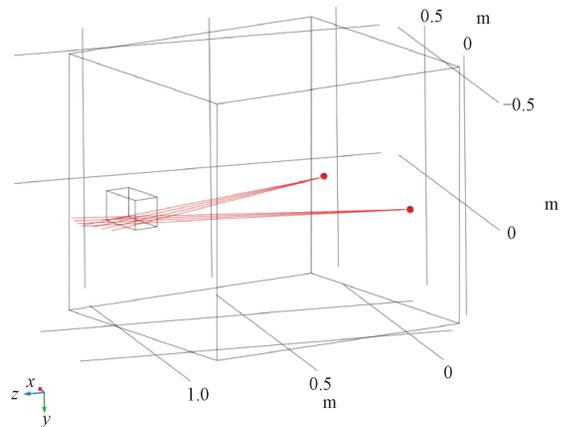
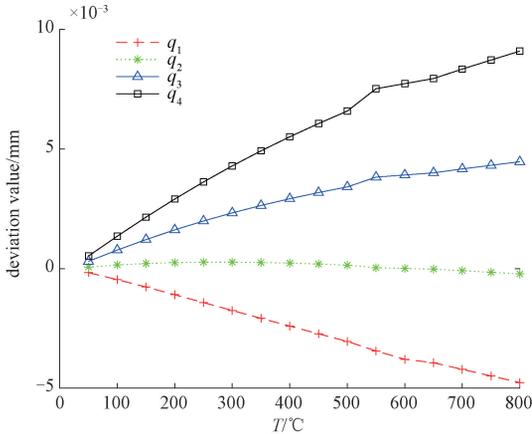


图 11 高温空气场内光线追迹
Fig. 11 Ray tracing in high temperature air field

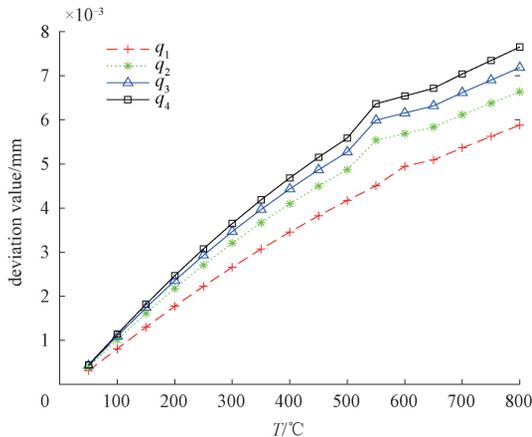
在求解出的空气折射率场内进行光线追迹计算。射线从相机光心发出,向着设定球心坐标方向出射,如图 11 所示。根据球心所在的物面与射线的交点计算出 4 球(炉口处从左至右编号依次为 1、2、3、4)球心在同一时刻、不同初始热源温度下在物面上 x 方向与 y 方向上的偏移距离,如图 12 所示。随着热源温度的升高,光线

偏移量呈增加趋势。800 ℃时,物面上 x 方向最大偏移量接近 0.010 mm,靠近炉口左右边界的球 1、球 4 方向的光

线偏移量大于炉中间的球 2、球 3 方向的光线的偏移量； y 方向最大偏移量 0.007 mm，由于 4 球高度相差不大，相互之间的偏转量差值小于 $1.5 \mu\text{m}$ 。



(a) x方向光线偏移量
(a) Light offset in x direction



(b) y方向光线偏移量
(b) Light offset in y direction

图 12 左相机坐标系下 4 球球心方向光线偏移量

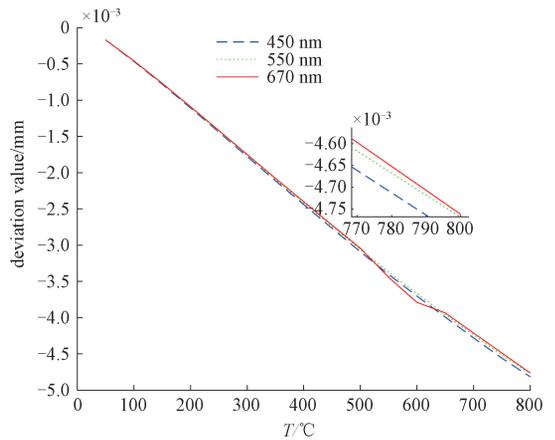
Fig. 12 Light offset in 4 balls under the left camera coordinate system

根据空气折射率计算公式可知，高温场内折射率变化和光的波长相关，为此对同一出射方向下 3 种波段光谱的光线偏移进行仿真验证，数据处理结果如图 13 所示。左相机坐标系下 x 方向和 y 方向上多条误差曲线接近重合，说明可见光下不同波段对光线偏移产生的影响较小。通过对比 3 种波段偏移量，红光波段的光线偏移量相对较小。

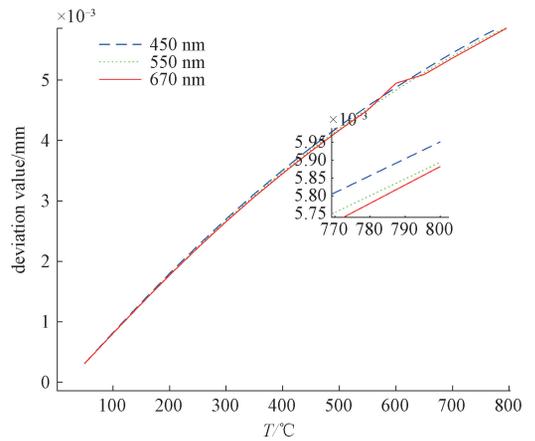
3 实验

3.1 实验系统搭建

本次实验装置由 LED 远心平行光源、窄带滤光片、COMS 相机、数显电阻高温炉、氮化硅陶瓷球和底座等元



(a) x方向光线偏移量
(a) Light offset in x direction



(b) y方向光线偏移量
(b) Light offset in y direction

图 13 不同波段下球心方向光线偏移量

Fig. 13 Light offset in the ball center direction under different bands

件组成，如图 14 所示。

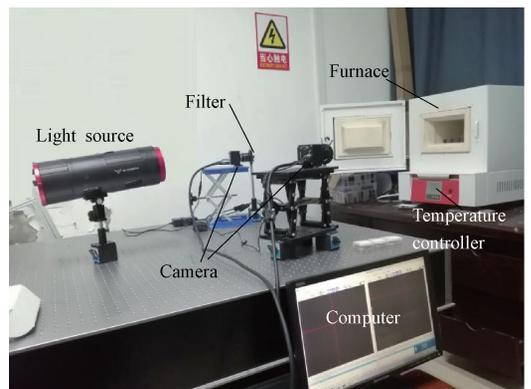


图 14 实验装置

Fig. 14 Experimental installation

实验中使用的 LED 远心平行光源，由大功率 LED 点

光源经三重凸透镜聚焦形成,具有辐通量高、辐照度均匀和光线平行性好等特点。滤光片包括 3 种波段窄带滤光片:中心波长 450 nm 的(光谱波段 440~460 nm)蓝光波段滤光片,中心波长 550 nm 的(光谱波段 540~560 nm)绿光波段滤光片和中心波长 670 nm 的(光谱波段 660~680 nm)红光波段滤光片。每种滤光片只允许特定波段光通过,隔绝大量干扰光。使用的 CMOS 工业相机分辨率为 2 048×2 048 pixel,像元尺寸为 5.5 μm。

3.2 图像采集对比实验

为了验证本文方法在高温下图像质量提升的效果,分别采用常温与高温环境下的实验进行对比。以耐高温材料氮化硅球作为实验对象,直径为 20 mm,直径误差 ±2 μm,线膨胀系数 $2.8 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$ 。4 颗球成直线排列并平行于炉口放置,两相机连线到炉口平面距离约 1 m。通过数字温度控制器控制炉内温度。温度每升高 50 °C,稳定一段时间后打开炉门。经过 10 min 空气传热后,对待测球在不同波段滤光片下进行视觉测量。设置相机图像采集间隔为 0.1 s,每次采样 20 张图像。部分图像采集结果如图 15 所示。

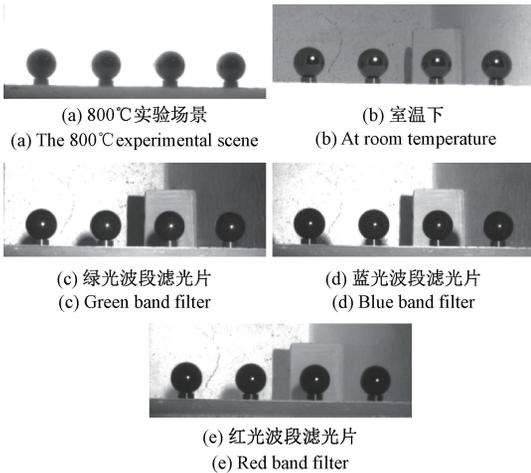


图 15 室温下无滤光片成像和 800 °C 下相机不同谱段的成像对比实验

Fig. 15 Imaging without filter at room temperature and imaging of different segments of the camera at 800 °C

以室温下拍摄的图像作为参考图像,如图 15(b)所示。图 15(a)为 800 °C 下实验拍摄场景,800 °C 时球的边缘和背景淹没在辐射光中且球的周围出现了伪边缘光晕。图 15(c)~(e)为 CMOS 相机在 800 °C 时加载滤光片拍摄的结果。实验中使用的是窄带滤光片能够隔绝大量光通过,此时图像亮度偏暗,需要高强光源辅助照明,从图像采集的结果中可以看出,在 3 个谱段下球形构件的轮廓清晰可见,边缘处的光晕也被滤除。

3.3 构件图像预处理与特征提取

高温构件图像预处理方法一般包括灰度化、图像平滑等。实验中得到的图像由灰度相机采集得到,因此不需要图像灰度化操作。为了提取图像中的球心像素坐标,需要对图像进行滤波平滑处理,滤除图像中背景噪声的干扰。采用高斯滤波、均值滤波、中值滤波和双边滤波 4 种滤波方法对图像进行噪声滤除对比实验,实验效果如图 16(b)~(e)。在滤除图像噪声的基础上,均值滤波后图像模糊程度最高,边缘细节被严重破坏;高斯滤波后的图像模糊程度比均值滤波弱;中值滤波和双边滤波后都能很好的保存图像边缘,但双边滤波后的图像边缘对比度优于中值滤波处理效果。因此选择双边滤波方法对获取的图像进行去噪处理。

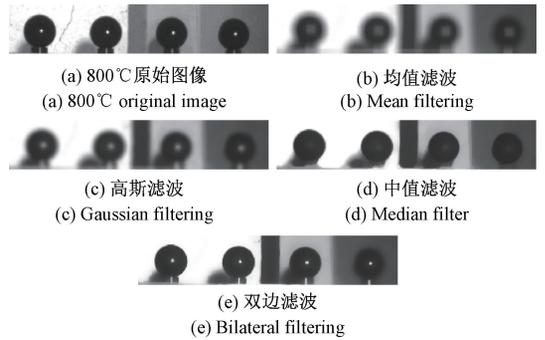


图 16 构件图像滤波效果对比

Fig. 16 Component image filtering effect comparison

对滤波后的图像进行边缘检测,对比常用的 4 种边缘检测算法的检测效果如图 17 所示,基于 Sobel 算法提取的边缘线较粗,定位精度差;Roberts 算法提取的构件边缘畸变严重,抗干扰能力弱;Prewitt 算法提取的边缘含有很多伪边缘,检测准确度比 Sobel 算法更低;Canny 算法提取结果图像较为清晰,可以明显看出轮廓边缘,伪边缘少,定位准确度较高。综上本文选用 Canny 算法来提取实验对象的边缘特征。

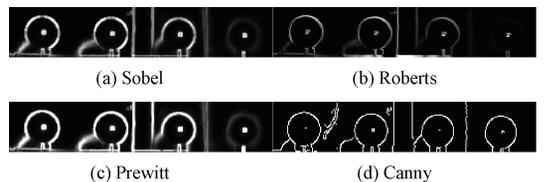


图 17 构件图像边缘提取效果对比

Fig. 17 Component image edge extraction effect comparison

使用 Canny 边缘检测算法提取球边缘特征后,使用 OpenCV 库中包含的 fitEllipse 函数用于构件图像中心的定位和提取,fitEllipse 函数在有遮挡和噪声的情况下都能进行检测,而且计算效率高。在图像预处理的基础上

对图像进行感兴趣区域分割并分别提取球心像素坐标,拟合效果如图 18 所示,通过该方法能够准确获取构件中心像素坐标。

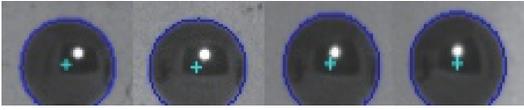
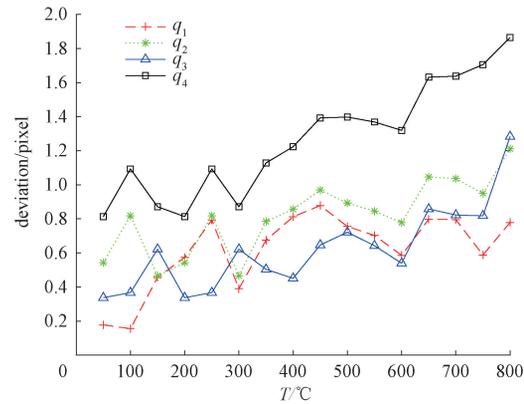


图 18 球心像素提取结果

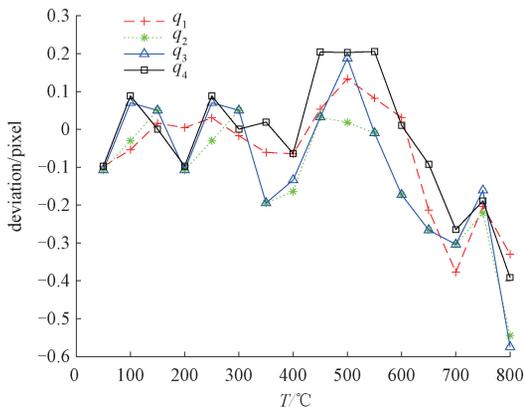
Fig. 18 Ball center pixel extraction results

3.4 测量数据与分析

对 16 组不同温度下采集的图像进行特征提取,以常温下提取的球心像素坐标作为参考标准值,绘制 16 组温度下球心像素偏移量与温度之间的关系,如图 19 所示, u 方向上中间两球的像素偏移比两侧的球心像素偏移小,随着温度升高像素偏移也逐渐增大; v 方向上 4 个球心像素偏移基本一致,整体偏移趋势沿 v 的负方向增加,与仿真结果基本一致。



(a) u 方向像素偏移量
(a) Pixel offset in u direction

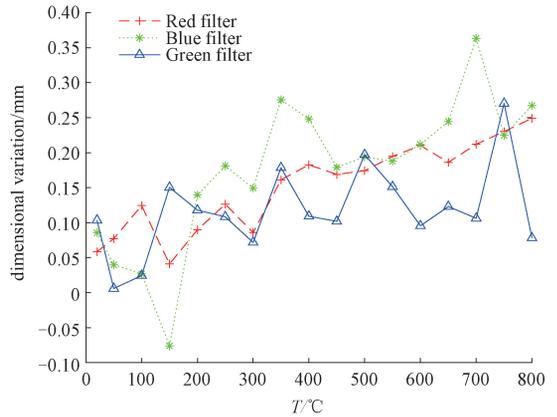


(b) v 方向像素偏移量
(b) Pixel offset in v direction

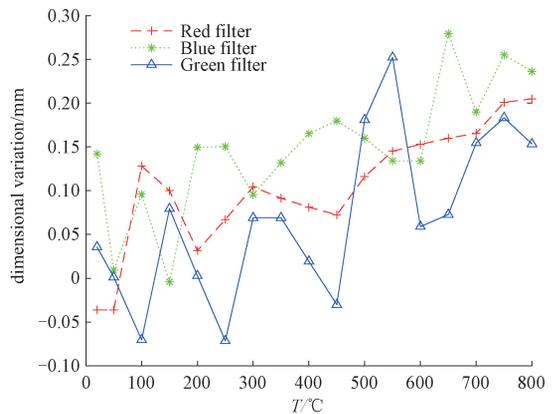
图 19 红光波段球心像素随温度变化

Fig. 19 The spherical center pixel of red light band changes with temperature

提取 4 个球的像素半径分别 21.58、20.10、19.61 和 18.66 pixel。根据球的直径为 20 mm 可以计算出球心附近 1 pixel 对应的实际长度分别为 0.46、0.50、0.51、0.54 mm。同理,对其他两个波段滤光片下采集图像进行相同数据处理,将仿真得到的光线偏移量转换成像素偏移量修正高温图像像素坐标。以室温下利用双目立体视觉测量重建球心坐标后的球心距离作为测量标准(此时测得球 1 和球 2、球 2 和球 3、球 3 和球 4 的球心距分别为 42.00、42.55、40.89 mm),对比不同波段滤光片下重建的球心距。计算出球心距误差结果如图 20 所示,随着温度的升高,球心距测量的误差逐渐增大。红光波段球心距测量误差最大为 0.25 mm;蓝光波段球心距测量误差最大为 0.28 mm;绿光波段球心距测量误差最大为 0.27 mm。测量的 17 组球心距的标准偏差小于 0.11 mm,红光波段测量结果相对于蓝光波段和绿光波段更加稳定。但是测量的球间距相对于常温测量值仍存在偏差,这些偏差产生的原因可能为:高温炉内壁材料的热膨胀;提取图像中球心像素坐标时的误差;滤光片参数、安装位置倾斜等因素的影响。球心间距标准差如表 1 所示。



(a) 球 1~2 距离误差
(a) Ball 1~2 distance error



(b) 球 2~3 距离误差
(b) Ball 2~3 distance error

常温测量时,在加载红光波段滤光片拍摄的图像上

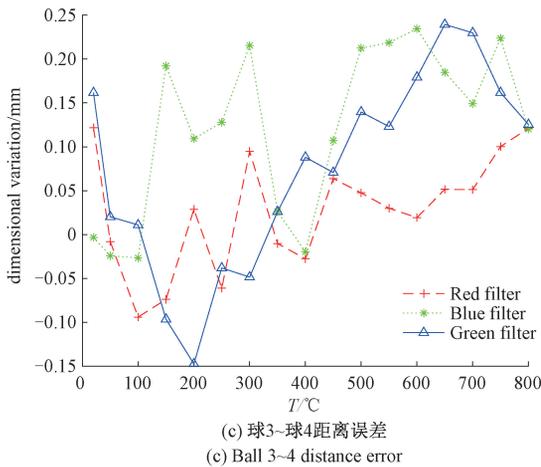


图 20 与常温视觉测量结果对比相邻球心距离误差
Fig. 20 Comparison of distance error between adjacent center and normal temperature vision measurement

表 1 球心间距标准差

Table 1 Standard deviation of center distance

滤光片种类	球 q_1 ~ 球 q_2 /mm	球 q_2 ~ 球 q_3 /mm	球 q_3 ~ 球 q_4 /mm
蓝光	0.07	0.09	0.10
绿光	0.09	0.11	0.06
红光	0.07	0.06	0.06

4 结 论

本文在研究非均匀温度梯度成像规律的基础上,建立了高温双目视觉测量误差模型,并基于光线追迹算法原理探究了高温变折射率场内光线偏折规律。通过搭建窄带滤光片和强平行光源组成的双目立体视觉测量系统,消除了高温辐射光的干扰。对高温下采集的图像进行球心特征提取的实验,结果表明,球安放在不同位置以及采用不同波段滤光片下的球心像素坐标偏移数据规律基本与仿真结果基本一致。此外,相较于常温测量结果,800 °C 以下球心距视觉测量结果误差小于 0.28 mm,测量标准偏差小于 0.11 mm,验证了本文研究的测量模型的合理性,为进一步研究大型高温物体的测量和测量系统的优化提供了参考。

参考文献

- [1] DENG H X, WANG F, ZHANG J, et al. Vision measurement error analysis for nonlinear light refraction at high temperature[J]. *Applied Optics*, 2018, 57(20): 5556-5565.
- [2] 瑚琦, 蔡文龙, 卢定凡, 等. 基于嵌入式的双目视觉采棉测距系统[J]. *电子测量技术*, 2020, 43(7): 172-178.
HU Q, CAI W L, LU D F, et al. Embedded binocular vision cotton picking distance system [J].

Electronic Measurement Technology, 2020, 43 (7): 172-178.

- [3] 张玉登, 刘新妹, 殷俊龄. 基于机器视觉的 PCB 图像焊点数据自动识别技术[J]. *国外电子测量技术*, 2020, 39(11): 12-16.
ZHANG Y D, LIU X M, YIN J L. Automatic recognition technology of PCB image solder joint data based on machine vision [J]. *Foreign Electronic Measurement Technology*, 2020, 39(11): 12-16.
- [4] JIA Z, WANG B, WEI L, et al. An improved image acquiring method for machine vision measurement of hot formed parts [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2010, 210(2): 267-271.
- [5] 王立忠, 赵建博, 谈杰, 等. 高强钢薄板高温焊接变形的视觉测量[J]. *光学精密工程*, 2020, 28(2): 283-295.
WANG L ZH, ZHAO J B, TAN J, et al. Visual measurement of high-temperature welding deformation for high-strength steel sheet [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2020, 28(2): 283-295.
- [6] HAILE M A, IFJU P G. Application of elastic image registration and refraction correction for non-contact underwater strain measurement [J]. *Strain*, 2012, 48(2): 136-142.
- [7] JIA Z Y, LIU Y, LIU W, et al. A spectrum selection method based on SNR for the machine vision measurement of large hot forgings [J]. *Optik*, 2015, 126(24): 5527-5533.
- [8] 徐霜艳, 张进, 万杰, 等. 高温构件傅里叶单像素成像系统设计[J]. *光学精密工程*, 2021, 29(8): 1804-1810.
XU SH Y, ZHANG J, WAN J, et al. Design of Fourier single-pixel imaging system for high-temperature components [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2021, 29(8): 1804-1810.
- [9] QUENTIN L, RÜDIGER BEERMANN, REINKE C, et al. Adapted fringe projection sequences for changing illumination conditions on the example of measuring a wrought-hot object influenced by forced cooling [J]. *Sensors*, 2021, 21(5): 1599.
- [10] 吴军, 徐海涛, 王志军, 等. 运用光线追迹算法的非均匀温度梯度成像畸变校正[J]. *机械科学与技术*, 2019, 38(11): 1784-1789.
WU J, XU H T, WANG ZH J, et al. Nonuniform temperature gradient imaging distortion correction using light ray tracing method [J]. *Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering*, 2019, 38(11): 1784-1789.
- [11] 代少升, 刘发萍. 红外热成像系统温度漂移补偿算法

研究[J]. 重庆邮电大学学报, 2012, 24(1): 69-72.

DAI SH SH, LIU F P. Study on temperature drift compensation of infrared thermal imaging system [J]. Journal of Chongqing University of Posts and Telecommunications, 2012, 24(1): 69-72.

[12] 韩燕, 强希文, 冯建伟, 等. 大气折射率高度分布模式及其应用[J]. 红外与激光工程, 2009, 38(2): 267-271.

HAN Y, QIANG X W, FENG J W, et al. Height distribution profiles and its application of atmosphere refractive index [J]. Infrared and Laser Engineering, 2009, 38(2): 267-271.

[13] 金群锋. 大气折射率影响因素的研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2006.

JIN Q F. Research on influence factors of atmospheric refractive index [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2006.

[14] 石磊, 朱洪海, 于雨, 等. 基于双目立体视觉的波浪参数遥测方法研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2019, 33(3): 99-104.

SHI L, ZHU H H, YU Y, et al. Measurements of wave characteristics based on binocular vision [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2019, 33(3): 99-104.

[15] 于鲲, 丛明煜, 戴文聪. 基于三维模型的空间目标视觉位姿测量[J]. 仪器仪表学报, 2019, 40(4): 179-188.

YU K, CONG M Y, DAI W C, Spatial target vision pose measurement based on 3D model [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2019, 40(4): 179-188.

[16] BIRJUKOV M, JEGOROV A, JAKOVIES A, et al. Design optimization automation for luminaire reflectors using COMSOL multiphysics and performance comparison against zemax opticstudio [C]. 2019 XXI International Conference Complex Systems: Control and Modeling Problems (CSCMP), 2019.

[17] 张引, 邵俊峰, 汤伟. TEA CO₂ 长波红外激光对红外凝视成像系统探测器组件的损伤效应[J]. 光学精密工程, 2021, 29(6): 1217-1224.

ZHANG Y, SHAO J F, TANG W. Damage effect of TEA CO₂ long wave infrared laser on detector assembly of infrared staring imaging system [J]. Optics and Precision Engineering, 2021, 29(6): 1217-1224.

作者简介

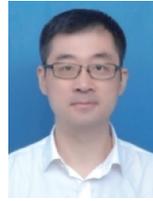


万杰, 2012年于北华航天工业学院获得学士学位, 现为合肥工业大学硕士研究生, 主要研究方向为高温多光谱双目视觉测量技术。

E-mail: wanjie0827@mail.hfut.edu.cn

Wan Jie received his B. Sc. degree from

North China Institute of Aerospace Engineering in 2012. He is currently a M. Sc. candidate at Hefei University of Technology. His main research interests include high temperature multispectral binocular vision measurement technology.



张进(通信作者), 2005年于合肥工业大学获得学士学位, 2007年于天津大学获得硕士学位, 2010年于天津大学获得博士学位, 现为合肥工业大学教授, 主要研究方向为视觉检测及动态测试。

E-mail: zhangjin@hfut.edu.cn

Zhang Jin (Corresponding author) received his B. Sc. degree from Hefei University of Technology in 2005, received his M. Sc. degree from Tianjin University in 2007, received his Ph. D. degree from Tianjin University in 2010. He is currently a professor at Hefei University of Technology. His main research interests include visual inspection and dynamic testing.



刘远航, 2020年于合肥工业大学获得学士学位, 现为合肥工业大学仪器科学与光电工程学院硕士, 主要研究方向为散射环境中的标准量的测量。

E-mail: 2020110055@mail.hfut.edu.cn

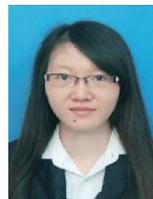
Liu Yuanhang received his B. Sc. degree from Hefei University of Technology in 2020. He is currently a M. Sc. candidate at Hefei University of Technology. His main research interest includes standard measurement in scattering environment.



夏豪杰, 2006年于合肥工业大学获得博士学位, 现为合肥工业大学教授, 主要研究方向为光电精密测量技术、微纳测控系统、仪器精度理论、精密仪器设计。

E-mail: hjxia@hfut.edu.cn

Xia Haojie received his Ph. D. degree from Hefei University of Technology in 2006. He is currently a professor at Hefei University of Technology. His main research interests include photoelectric precision measurement technology, micro-nano measurement and control system, instrument precision theory, precision instrument design.



王君, 2012年于重庆理工大学获得学士学位, 2016年于合肥工业大学获得硕士学位, 现为合肥工业大学在读博士, 主要研究方向为动态测试及不确定度研究。

E-mail: jwang@mail.hfut.edu.cn

Wang Jun received her B. Sc. degree from Chongqing University of Technology in 2012, received her M. Sc. degree from Hefei University of Technology in 2016. She is currently a Ph. D. candidate at Hefei University of Technology. Her main research interests include dynamic test and uncertainty research.