

基于主动发光标志点的变体机翼视觉测量方法

杜新涛 徐志伟

Visual measurement method for morphing wings based on active luminous markers

DU Xintao, XU Zhiwei

引用本文:

杜新涛, 徐志伟. 基于主动发光标志点的变体机翼视觉测量方法[J]. 应用光学, 2025, 46(5): 1073–1082. DOI: 10.5768/JAO202546.0503002

DU Xintao, XU Zhiwei. Visual measurement method for morphing wings based on active luminous markers[J]. Journal of Applied Optics, 2025, 46(5): 1073–1082. DOI: 10.5768/JAO202546.0503002

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.5768/JAO202546.0503002>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于双目视觉的大型高反光构件测量系统

Measurement system of large-scale high reflective component based on binocular vision

应用光学. 2021, 42(4): 577–585 <https://doi.org/10.5768/JAO202142.0401002>

一种基于双目视觉的箭体晃动在线监测方法

On-line monitoring method of rocket body sloshing based on binocular vision measurement

应用光学. 2022, 43(1): 81–86 <https://doi.org/10.5768/JAO202243.0103002>

基于双目视觉的车身焊点定位误差补偿研究

Research on compensation for positioning errors of carbody welding points based on binocular vision

应用光学. 2021, 42(1): 79–85 <https://doi.org/10.5768/JAO202142.0102005>

基于目标运动的复眼式双目视觉测距法

Compound eye binocular vision ranging method based on target motion

应用光学. 2020, 41(3): 571–579 <https://doi.org/10.5768/JAO202041.0303005>

基于DETR的道路环境下双目测量系统

DETR-based binocular measurement system in road environment

应用光学. 2023, 44(4): 786–791 <https://doi.org/10.5768/JAO202344.0402003>

基于单目视觉的矩形靶面弹着点测量

Measurement of impact point of rectangular target surface based on monocular vision

应用光学. 2021, 42(1): 131–136 <https://doi.org/10.5768/JAO202142.0103006>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

文章编号: 1002-2082 (2025) 05-1073-10

引用格式: 杜新涛, 徐志伟. 基于主动发光标志点的变体机翼视觉测量方法 [J]. 应用光学, 2025, 46(5): 1073-1082.

DU Xintao, XU Zhiwei. Visual measurement method for morphing wings based on active luminous markers[J]. Journal of Applied Optics, 2025, 46(5): 1073-1082.



在线阅读

基于主动发光标志点的变体机翼视觉测量方法

杜新涛, 徐志伟

(南京航空航天大学 航空航天结构力学及控制全国重点实验室, 江苏 南京 210000)

摘要: 机翼在飞行过程中会发生动态形变, 从而影响飞行器的性能与安全。双目视觉测量技术能够实现非接触、高精度的三维测量, 但传统方法易受环境光线干扰且实时性较差。提出了一种基于主动发光标志点的机翼变形双目视觉测量方法, 通过主动发光标志点和基于特征掩膜的快速质心定位算法, 有效改善了环境光线变化导致的识别困难和精度降低问题。此外, 基于误差理论建立了双目视觉系统位移测量误差模型。最后通过实验表明, 在测量变体机翼的静态形变位移和动态偏转角度时, 实验误差与提出的误差模型能较好地吻合, 位移误差小于 0.5 mm, 角度误差控制在 0.5° 以内, 在 150 Hz 以下的动态测量中与原始信号的相关性高于 0.97。该系统具有抗环境光干扰、实时性强、设备要求低等优点, 为机翼变形监测提供了一种实用的解决方案。

关键词: 双目视觉; 变体机翼; 位移测量; 图像处理; 亚像素; 质心法

中图分类号: TN206; TP391

文献标志码: A

DOI: 10.5768/JAO202546.0503002

Visual measurement method for morphing wings based on active luminous markers

DU Xintao, XU Zhiwei

(National Key Laboratory of Mechanics and Control of Aerospace Structures, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210000, China)

Abstract: Dynamic deformation of aircraft wings during flight significantly impacts aircraft performance and safety. Binocular vision measurement technology enables non-contact, high-precision three-dimensional measurement, however, conventional methods are susceptible to ambient light interference and exhibit limited real-time performance. This paper presented a novel binocular vision measurement method for wing deformation based on active luminous markers. Through the implementation of active luminous markers and a feature mask-based rapid centroid localization algorithm, the method effectively mitigated the issues of marker identification difficulty and measurement accuracy degradation caused by environmental lighting variations. Additionally, an error model for the displacement measurement of the binocular vision system was established based on error theory. Experimental results demonstrated that when measuring static deformation displacement and dynamic deflection angles of a morphing wing, the experimental errors correlated well with the proposed error model. The displacement errors were less than 0.5 mm and angular errors were within 0.5°. For dynamic measurements at frequencies up to 150 Hz, the correlation coefficient with the reference signal exceeded 0.97.

收稿日期: 2024-09-12; 修回日期: 2024-12-13

基金项目: 陆航预先研究项目 (LZY20230805127)

第一作者: 杜新涛, E-mail: dxthlms@nuaa.edu.cn

通信作者: 徐志伟, E-mail: zhwxu@nuaa.edu.cn

The system offers advantages including robustness for environmental light interference, high real-time performance, and low equipment requirements, providing a practical solution for wing deformation monitoring.

Key words: binocular vision; morphing wings; displacement measurement; image processing method; sub-pixel; centroid method

引言

机翼在飞行过程中,受气动力影响,往往会产生较大的动态形变,最终影响飞行器的升阻比、滚转力矩、偏航力矩等气动性能,进而影响飞行器的安全性能及使用寿命^[1-3]。对机翼三维姿态的精确测量可以在前期设计和测试阶段为飞行器气动性能优化提供关键的数据支持,辅助优化机翼设计,从而提高飞行器的飞行性能,在日常运行中也可以辅助调整飞机的飞行姿态,以及辅助进行飞机的故障诊断,确保机翼的健康状态,是飞机高效、安全、稳定运行的关键。传统的机翼形变测量方法如利用应变片^[4]、加速度计^[5]、位移传感器^[6]等,均存在易受电磁干扰、空间分辨率受限、系统布线复杂等缺点。双目视觉测量技术凭借其非接触、高精度、高效率 and 稳定性等优势,已成为机翼形变测量研究的一个重要方向,在航空领域广泛应用,如无人机机翼的变形实时监测^[7]、高超声速风洞试验机翼变形测量^[8]、直升机飞行试验中的旋翼动态变形测量等^[9]。

尽管国内外学者在双目视觉测量技术领域取得了显著进展,该技术在实际应用中仍面临诸多挑战^[10]。特别是在飞行试验过程中,相机拍摄环境往往较为恶劣,强光导致过曝光,夜间环境下欠曝光^[11],以及雨、雾、雪等复杂天气条件造成的图像质量下降^[12],这些因素都会显著影响双目相机测量系统的目标识别能力和空间定位精度,进而降低测量准确性。

针对这些问题,研究人员提出了多种改进方案。文献[13]和文献[14]提出了基于多曝光的图像增强方法,该方法依据相机响应曲线对不同曝光量的图像进行区域拼合,虽然在提升图像质量方面有效,但是图像处理时间长,对拍摄设备要求较高,并且拍摄过程中要保证场景和相机都严格静止以确保多帧图像的准确配准。文献[15]提出了结合色彩和亮度信息的补偿方法,该方法取图像前后各 3% 的像素作为参考值对图像进行亮度补偿,并通过同态滤波将颜色变化转化为亮度变化增强图像细节,然而,该方法的参数设置具有经验性,且涉及色彩空间转换、同态滤波等多个复杂

处理步骤。文献[16]和文献[17]则借助神经网络技术,对复杂环境下的图像进行增强,但该方法也存在实时性差、泛化性不足等缺点。

本文基于国内外对机翼变形测量的研究情况,搭建了机翼动态变形测量系统,提出了基于主动发光标志点的视觉测量方法,结合基于特征掩膜的快速质心定位方法,可以显著改善由于环境光线变化导致的无法识别和精度下降问题,实现快速高效的实时测量,克服传统测量方式易受电磁干扰、系统布线复杂等缺点。此外,本文基于双目视觉测量原理及误差理论,建立了双目视觉系统位移测量误差模型。通过一系列实验,验证了本文提出的方法可以有效提高双目测量系统的测量精度,且具备抗环境光干扰的能力,具有一定实用价值和参考意义。

1 双目测量系统设计

1.1 系统组成及功能

本文搭建的基于双目视觉的测量系统的结构如图 1 所示,系统主要包括双目相机、标志点、数据线、同步触发器、同步触发控制线和上位机 5 个部分。

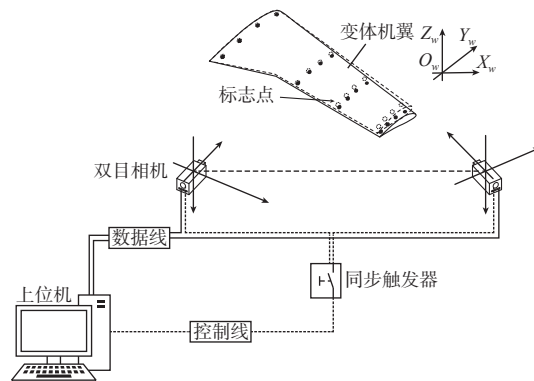


图 1 双目视觉测量系统结构图

Fig. 1 Schematic diagram of the binocular vision measurement system

两台高速双目相机固定在三角支架上,通过同步触发器的信号同步采集图像,捕获的图像通过数据线传输至上位机等待处理。采集结束后,根

据两台相机组合标定的参数,对获得的图像进行目标提取、空间位置解算等分析,实现对变体机翼姿态的动态测量。

本文采用 HIKROBOT MV-CS004-10UM 黑白工业相机进行图像采集。该型号相机体积小巧、重量轻便,具有高采样速率的特点和外部触发功能。搭配 8 mm F2.4 定焦镜头,可以达到水平 34.5°,垂直 26.2°的视场角。具体参数如表 1 所示。

表 1 相机参数表

Table 1 Camera parameters table

参数名称	参数值
型号	MV-CS004-10UM
靶面尺寸	1/2.9"
像元尺寸	6.9 μm×6.9 μm
最大分辨率	720×540
最大帧率	526.5 帧/s @720×540 Mono 8
黑白/彩色	黑白
数据接口	USB 3.0

两台相机采用 USB 3.0 协议传输数据,为确保两台相机能够同时满帧率采集和传输图像,须采用支持双 USB 3.0 接口的上位机,且硬盘读写速率应不低于 391 MB/s。外部触发器则采用 STM32 单片机作为触发源。

1.2 双目测量系统的数学模型

双目视觉测量的原理基于光学测量中的三角测量关系。首先构建双目视觉测量系统原理的数学模型,如图 2 所示。其中, O 为相机坐标系的原点,也是左相机的光心; O_1 和 O_2 分别为左右相机图像坐标系的原点; $P(x, y, z)$ 为待测点; P' 为待测点在水平面上的投影点; $P_1(X_1, Y_1)$ 与 $P_2(X_2, Y_2)$ 分别为 P 在像平面上的投影点; B 为两相机的基线长; β_1 和 β_2 为垂直视场角; ω_1 和 ω_2 为水平视场角; α_1 和 α_2 为光轴与基线间的夹角; f_1 和 f_2 为两相机的焦距。

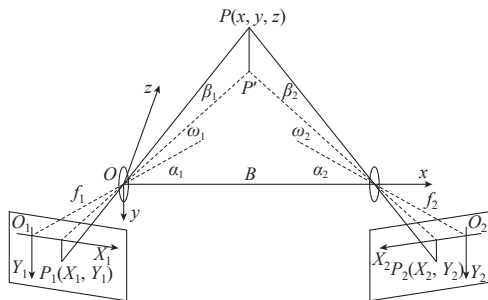


图 2 双目相机成像模型

Fig. 2 Imaging model of binocular camera system

根据图 2 中的结构关系,待测点 P 的坐标可表示为^[18]

$$\begin{cases} x = \frac{B \cdot \cos(\alpha_1 + \omega_1) \cdot \sin(\alpha_2 + \omega_2)}{\sin(\alpha_1 + \omega_1 + \alpha_2 + \omega_2)} \\ y = \frac{B \cdot \sin(\alpha_2 + \omega_2) \cdot \tan \beta_1}{\sin(\alpha_1 + \omega_1 + \alpha_2 + \omega_2)} = \frac{B \cdot \sin(\alpha_1 + \omega_1) \cdot \tan \beta_2}{\sin(\alpha_1 + \omega_1 + \alpha_2 + \omega_2)} \\ z = \frac{B \cdot \sin(\alpha_1 + \omega_1) \cdot \sin(\alpha_2 + \omega_2)}{\sin(\alpha_1 + \omega_1 + \alpha_2 + \omega_2)} \end{cases} \quad (1)$$

式中: $\omega_1 = \arctan(X_1/f_1)$; $\omega_2 = \arctan(X_2/f_2)$; $\beta_1 = \arctan[Y_1 \cdot (\cos \omega_1)/f_1]$; $\beta_2 = \arctan[Y_2 \cdot (\cos \omega_2)/f_2]$ 。

假设两台相机拍摄的图片 x 方向的提取精度分别为 δ_{x_1} 、 δ_{x_2} , y 方向的提取精度分别为 δ_{y_1} 、 δ_{y_2} , 则待测点在 x 方向的测量精度为

$$\delta_x = \sqrt{\left(\frac{\partial x}{\partial X_1} \delta_{x_1}\right)^2 + \left(\frac{\partial x}{\partial X_2} \delta_{x_2}\right)^2} \quad (2)$$

待测点在 y 方向的测量精度为

$$\delta_y = \sqrt{\left(\frac{\partial y}{\partial X_1} \delta_{x_1}\right)^2 + \left(\frac{\partial y}{\partial X_2} \delta_{x_2}\right)^2 + \left(\frac{\partial y}{\partial Y_1} \delta_{y_1}\right)^2 + \left(\frac{\partial y}{\partial Y_2} \delta_{y_2}\right)^2} \quad (3)$$

待测点在 z 方向的测量精度为

$$\delta_z = \sqrt{\left(\frac{\partial z}{\partial X_1} \delta_{x_1}\right)^2 + \left(\frac{\partial z}{\partial X_2} \delta_{x_2}\right)^2} \quad (4)$$

实际测量中不可知标志点的三维空间坐标,只能测得标志点的相对空间位移。假设标志点移动前后在相机坐标系下的坐标为 $A(x_1, y_1, z_1)$ 和 $B(x_2, y_2, z_2)$, 则多次测量位移 D , 其测量精度为

$$\delta_D = \sqrt{\left(2 \frac{x_2 - x_1}{D} \delta_x\right)^2 + \left(2 \frac{y_2 - y_1}{D} \delta_y\right)^2 + \left(2 \frac{z_2 - z_1}{D} \delta_z\right)^2} \quad (5)$$

式(5)描述了利用双目测量系统测量距离 D 的测量误差的标准差,即测量的离散程度。

1.3 相机时间同步

双目相机支持软硬件触发,由于软件触发可能造成两个相机不同步的问题,因此本文用 STM32 单片机制作了外部硬件触发器。通过上位机可以设定相机的触发模式、曝光时间以及帧率等参数,单片机通过串口接收上位机设定的帧率,在 IO 口输出对应的触发信号,实现两个相机的同步。硬件同步过程如图 3 所示,触发器程序流程如图 4 所示。

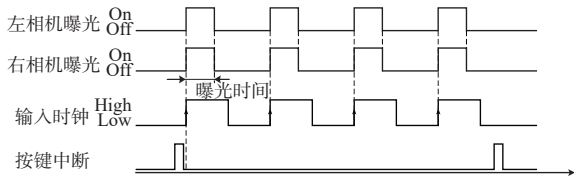


图 3 相机同步原理

Fig. 3 Principle of camera synchronization triggering

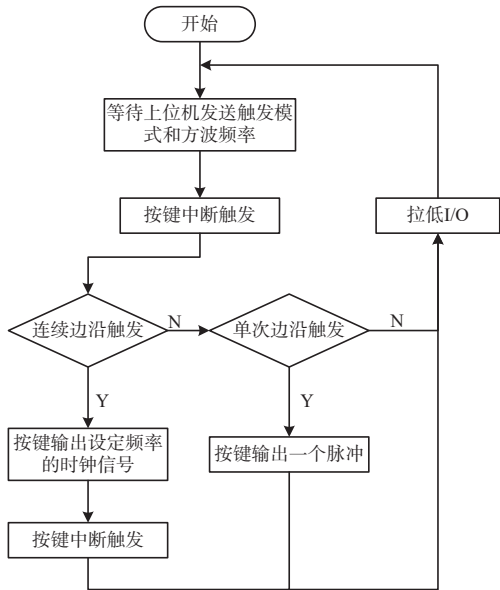
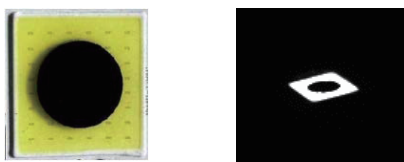


图 4 触发器程序流程图

Fig. 4 Flowchart of the trigger program

1.4 标志点的设计

本文采用的标志点为主动发光式标志点,如图 5 所示。整体采用白色 LED 作为发光背景,内圈粘贴黑色实心圆形标志物,如图 5(a) 所示。考虑到实际工况中,受机体结构限制,用于拍摄机翼表面标志点的相机只能安装在机舱内部、垂尾和机身顶部等特定位置,导致相机对标志点的观测角度较大,这种倾斜成像条件会使标志点产生显著的透视变形。相比角点型标志点,圆形标志点具有几何形状均匀、轴对称性好的特点,即使在较大透视变形条件下仍能保持良好的几何特征。实验结果表明^[19],基于白色 LED 背景的圆形标志点设计在复杂环境(雨、雾、雪)下具有良好的对比度。



(a) 标志点实物图 (b) 标志点成像效果图 (曝光时间为 15 μs)

图 5 主动式 LED 发光标志点

Fig. 5 Active LED marker

在工程实践中,主动发光标志点的发光强度需满足两个关键要求:一是高于环境光照强度,二是在工作电压范围内保持稳定输出。这些要求使双目相机系统能够基于标志点的恒定亮度设置最优曝光参数,既确保标志点的理想成像效果,又能有效抑制环境光带来的干扰。

关于标志点尺寸的选择, AHN S J 等人^[20]通过建立完整的数学模型,发现过大的标志点不会提升图像点测量精度,这是因为偏心误差与目标尺寸呈二次方关系增长,其研究表明,标志点成像的长轴直径以 5 像素~10 像素为宜。因此,标志点的实际物理尺寸应当结合具体应用场景,基于上述原则进行优化设计。

2 基于轮廓特征的标志点快速定位算法

常用的椭圆中心定位方法有轮廓拟合法和质心法。当轮廓边缘点数较少时,质心法的提取精度要优于轮廓拟合法,因而本文利用质心法完成椭圆中心的精确定位。加权质心法原理为^[18]

$$\begin{cases} X_0 = \frac{\sum_x \sum_y F^2(X, Y) \cdot X}{\sum_x \sum_y F^2(X, Y)} \\ Y_0 = \frac{\sum_x \sum_y F^2(X, Y) \cdot Y}{\sum_x \sum_y F^2(X, Y)} \end{cases} \quad (6)$$

式中: (X_0, Y_0) 为通过加权质心法计算得出的亚像素坐标; $F(X, Y)$ 表示像素点 (X, Y) 的灰度值。

尽管质心法在强度分布均匀且形状规则的图像中能够实现较为精确的定位,但其抗干扰能力较弱,图像噪声对精度的影响较大。为此,本文提出了一种结合椭圆轮廓特征和图像掩膜技术的方法,消除噪声并提高计算精度和效率。定位算法流程如图 6 所示。

算法具体流程如下:

1) 首先读取校准后的图像,由于发光标志点在所采集的图像中可能仅占据较小区域,因此利用阈值分割原理从原始图像中将标志点部分裁切提取,减小后续图像处理过程中的冗余计算,从而显著缩短程序运行时间。

2) 将裁切后的图像复制两份,一份进行反相处理以备后用,另一份则进行高斯模糊和二值化处理,使用 OpenCV 库中的 `cv2.findContours` 方法检测图像中的轮廓,并根据返回的轮廓层级关系提取中心椭圆的大致轮廓。对于无法识别的情况,自适应调节高斯核大小和二值化阈值直至识别成功。

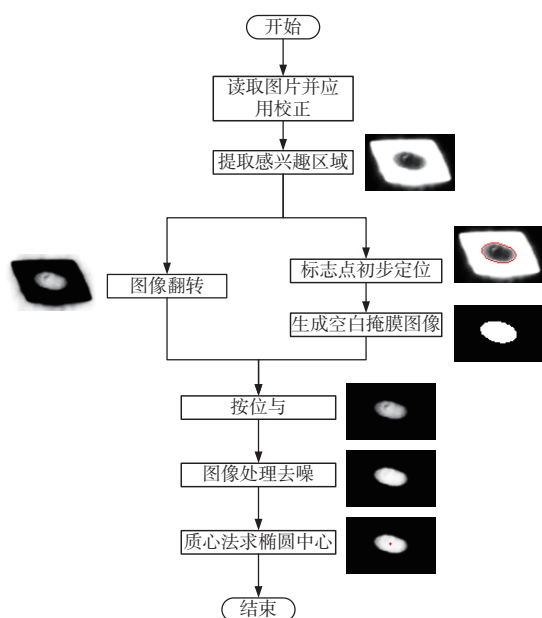


图6 定位算法流程图(图片为含环境光噪声的图像)

Fig. 6 Flowchart of the positioning algorithm (image contains ambient light noise)

3) 基于提取的椭圆轮廓像素, 拟合一个标准椭圆, 生成二值掩膜图。

4) 将反相后的图像与掩膜图像进行按位与操作, 获得优化后的标志点图像。此时的图像已经消除了大部分环境光的影响。

5) 对图像执行形态学闭运算和自适应伽马变换, 进一步去除可能存在的电噪声和环境光噪声。

6) 最后, 应用加权质心提取算法确定标志点中心的亚像素坐标。

3 实验与分析

3.1 椭圆中心点定位实验

为了验证基于轮廓特征的标志点快速定位算法的有效性, 本文采用仿真实验的方法来评估其定位误差。具体来说, 用 Python 生成如图 7 所示的一系列叠加有高斯噪声的随机椭圆图像, 模拟相机采集到的圆形标志点图像。



(a) 长轴为20 像素, 短轴为10 像素的椭圆 (b) 长轴为40 像素, 短轴为20 像素的椭圆 (c) 长轴为60 像素, 短轴为30 像素的椭圆

图7 生成的椭圆图像示例

Fig. 7 Examples of generated elliptical images

分别用本文的定位算法和传统的椭圆轮廓拟合法定位椭圆中心, 与一开始设定的椭圆中心比较求得坐标误差, 将每组得到的误差结果求平均, 画出如图 8 所示的随椭圆尺寸变化的平均误差变化曲线。

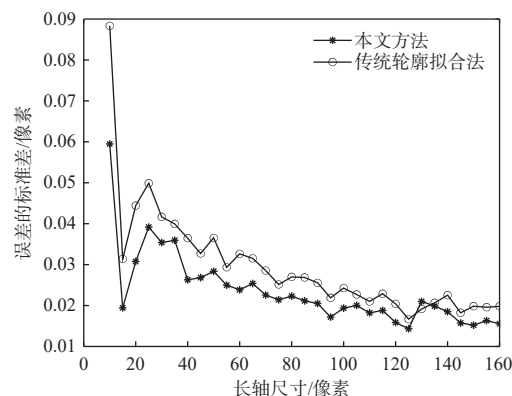


图8 不同椭圆尺寸下标志点中心的提取误差

Fig. 8 LED mark center extraction errors under different ellipse sizes

由实验结果可以看出, 本文提出的基于轮廓特征的快速定位算法相比传统轮廓拟合法, 具有明显优势: 在所有测试尺寸下(10 像素~160 像素)的定位误差均更小, 且随着椭圆尺寸减小, 定位精度的提升更为显著, 这表明该算法具有更好的鲁棒性和适应性。

其次, 不同椭圆尺寸下的测量误差数据可作为估算相机测量误差的重要参考依据, 将这些数据代入 1.2 节的计算公式, 可以推导出测量系统的理论精度。实验结果充分证明本文提出的算法在抗干扰能力和测量精度方面都具有明显的优势。

3.2 测量精度验证实验

为验证 1.2 节给出的测量误差数学模型, 本文搭建了如图 9 所示的双目视觉测量系统实验装置。



图9 双目视觉测量系统硬件组成

Fig. 9 Hardware composition of the binocular vision measurement system

本实验采用悬臂梁结构进行测试,悬臂梁一端固定于刚性支撑结构上。为获得较大的振动响应,在靠近固定端处设置激励点,由弹性固定在刚性支架上的激振器提供固定频率的激励信号。悬臂梁自由端贴有直径为 20 mm 的主动发光标志点,其正下方固定激光位移传感器探头,测量点设置在标志点中心在悬臂梁背面的投影位置。本实验所用激光位移传感器为基恩士 LK-G85,其量程为 ± 15 mm,测量精度达 15 μm 。由于该传感器具有较高的测量精度,故将其测量数据作为位移真值的参照,用于标定双目视觉测量系统的测量精度。激振系统采用 HEV-50 型激振器,其最大激振力不小于 50 N,最大振幅为 ± 5 mm,配套使用 HEAS-50 功率放大器提供所需的驱动功率。

双目相机的布置示意图如图 10 所示。设置实验相机的曝光时间为 15 μs ,外部上升沿信号触发。基线距离设定为 200 mm,此外两台相机与基线的夹角均调整至 $\alpha = 83^\circ$ 。设置双目相机与标志点平面的夹角为 30° 不变,相机在光心与标志点距离为 400 mm~1 500 mm 的范围内移动。

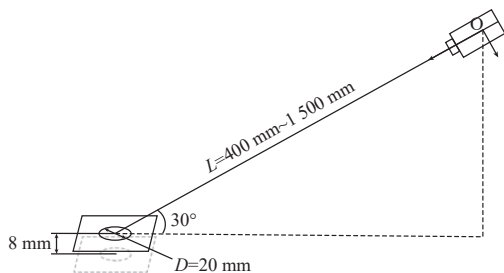


图 10 双目相机的实验布置示意图

Fig. 10 Schematic diagram of the binocular camera experimental setup

3.2.1 静态测量精度

由于相机传感器每个像素的物理尺寸在长宽方向上是一致的,为了简化计算过程,假定在像素坐标系 u 轴和 v 轴方向上存在相同的随机误差,即 $\delta_{x_1} = \delta_{x_2} = \delta_{y_1} = \delta_{y_2}$,其大小可以用章节 3.1 测量的不同椭圆尺寸下的测量误差数据作为参考。将误差值代入式(2)~式(5)中,可以得到理论的测量误差曲线。通过在悬臂梁上加荷载来改变标志点的空间位置,并且多次改变相机与标志点的距离进行实验。求取加载荷前后标志点的空间位移,与激光位移传感器结果对比求出误差,结果如图 11 所示。

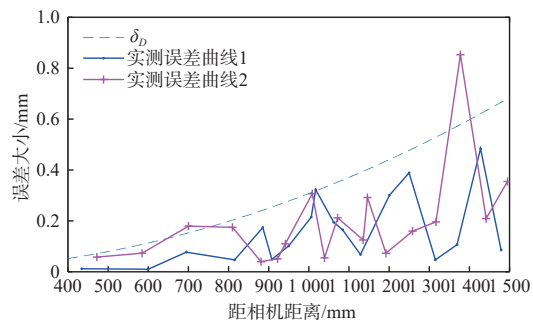


图 11 理论误差与测量误差随距离的变化曲线

Fig. 11 Curves of theoretical error and measurement error as a function of distance

图 11 中的 δ_D 曲线为计算出的理论误差曲线,实线为实际测量的两组误差曲线。通过图 11 可以看出,由于相机成像量化误差的存在,距离越远测量结果的不确定性越显著。

当测量距离在 800 mm 以内时,测量精度优于 0.2 mm,且测量误差大致随距离的增加而增加。当测量距离大于 800 mm 但小于 1 300 mm 时,测量误差波动较小,在 0.5 mm 以内。当测量距离大于 1 300 mm 时,误差的离散程度越来越大。

双目相机的测量结果可以近似看作正态分布,根据 3σ 原则,测量值与真实值的绝对误差大小分布在虚线以下的概率为 68.26%。大多数测量结果都集中在真实值附近,远离真实值的极端误差发生的概率较低。实验结果的整体趋势与基于误差计算公式得到的曲线相符,这表明误差计算公式可作为评估系统精度的有效参考。

3.2.2 动态测量精度

为验证双目测量系统的动态性能,利用激振器向机翼引入振动激励。激光位移传感器的采样频率设定为 1 kHz,双目相机的采样频率设定为 500 Hz,根据奈奎斯特采样定理,双目相机可以无失真地重建频率最高为 250 Hz 的信号。设定激光位移传感器和双目相机同步采样,双目相机与标志点的距离为 800 mm。待悬臂梁的振动频率和幅值稳定后,分别用激光位移传感器和双目相机同时记录一段时间的振动曲线,如图 12 所示。

分别计算双目相机和激光位移传感器两个测量列的 FFT (fast fourier transform) 频率、相关系数 ρ 和归一化均方误差 E_{NMS} 。对比两者测量的信号的吻合程度,得到的数据如表 2 所示。

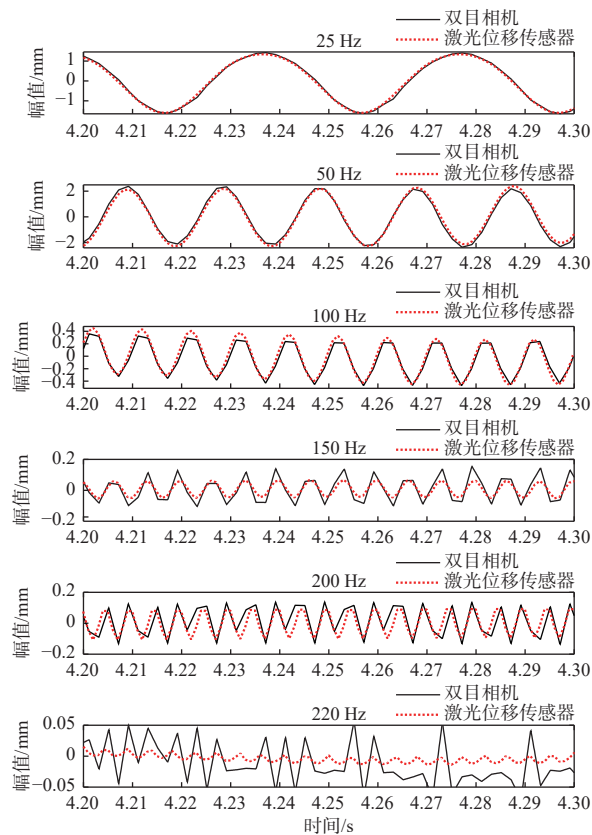


图 12 不同振动频率下的测量结果

Fig. 12 Measurement results at different vibration frequencies

表 2 双目视觉测量系统动态稳定性实验数据

Table 2 Experimental data for the dynamic stability of the binocular vision measurement system

序号	测量频率/Hz		频率 误差/Hz	平均振幅/mm (激光位移 传感器)	ρ	E_{NMS}
	视觉 方法	激光位移 传感器				
1	24.90	24.91	-0.01	1.473	0.986	0.029
2	50.78	50.82	-0.04	2.246	0.961	0.078
3	99.85	99.84	0.01	0.365	0.970	0.062
4	149.90	149.96	-0.06	0.055	0.934	0.615
5	199.95	199.98	-0.03	0.096	0.753	0.633
6	219.97	219.99	-0.02	0.013	0.230	>1

从表 2 中数据可以观察到, 针对单频振动, 在频率测量方面视觉测量系统有着较高的测量精度, 频率测量误差小于 0.06 Hz。而在振幅测量方面, 当振幅高于 0.2 mm 时, 信号还原程度较好, 双目测量信号和原始信号的相关系数可达 0.9 以上, 归一化均方误差也在 0.1 以下, 系统完全满足一般测量需求。当振幅小于 0.2 mm 时, 测量系统的测量准确性下降, 且振幅越小误差越大, 符合本文提出的误差数学模型。在实际应用时, 为获得更高

的测量精度, 建议将标志点布置在结构振动幅度较大的位置。

3.3 变体机翼变形监测实验

3.3.1 静态载荷加载实验

在研究某变后掠角机翼于不同载荷条件下的机翼形变量实验中, 利用本文设计的双目视觉测量系统测量机翼的形变, 实验系统如图 13 所示。

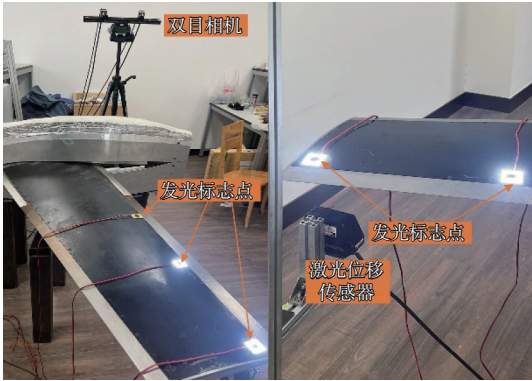


图 13 机翼测量系统图

Fig. 13 Diagram of the wing measurement system

机翼上表面黏贴直径为 20 mm 的标志点, 将双目视觉测量系统放置在机身侧, 距离发光标志点 1 200 mm 处, 模拟双目相机安装在机身侧面的情况。此时通过拍照测得标志点的成像长轴尺寸为 15 像素左右, 遵循 1.4 节中提到的尺寸设计原则。使用激光位移传感器测量位移作为理论值, 激光位移传感器的精度为 15 μm 。

在不同位置加载荷, 测量翼梢后缘标志点的位移。分别在日间光线不均匀环境(有阴影, 照度为 319.0 lux)和夜间光线不足环境(照度为 3.5 lux)下进行实验, 分别记录激光位移传感器和双目相机的测量结果, 数据如表 3 所示。测量结果和误差曲线如图 14 所示。

由表 3 可计算出日间和夜间环境下的平均测量误差分别为 0.41 mm 和 0.38 mm, 数据相差不大, 这表明采用主动发光标志点结合本文算法的测量方法具有良好的鲁棒性, 有效降低了环境光对测量精度的影响。多次实验得到的误差曲线平缓, 证实了系统具有良好的稳定性。

3.3.2 机翼动态偏转实验

由 1.2 节可知, 双目测量系统的测量误差主要集中在相机的 z 方向, 即深度方向。因此, 测量机翼偏转角度时, 将系统布置在正上方可获得更高的角度测量精度。实验测量系统如图 15 所示。

表 3 机翼变形测量结果

Table 3 Measurement results of wing deformation

环境条件	原始位置/mm (激光位移传感器)	加载后位置/mm (激光位移传感器)	理论位移/mm (激光位移传感器)	实测位移/mm (双目测量系统)	绝对误差/mm
日间光线不均匀环境	-8.406	-0.949	7.457	7.903	0.446
	-8.158	-1.075	7.083	6.736	0.347
	-8.267	-1.037	7.230	6.846	0.384
	-8.223	-4.925	3.298	3.753	0.455
夜间光线不足环境	-8.912	-1.147	7.765	7.324	0.441
	-8.225	-0.964	7.261	7.616	0.355
	-8.014	-2.713	5.301	5.692	0.391
	-8.222	-4.484	3.738	3.423	0.315

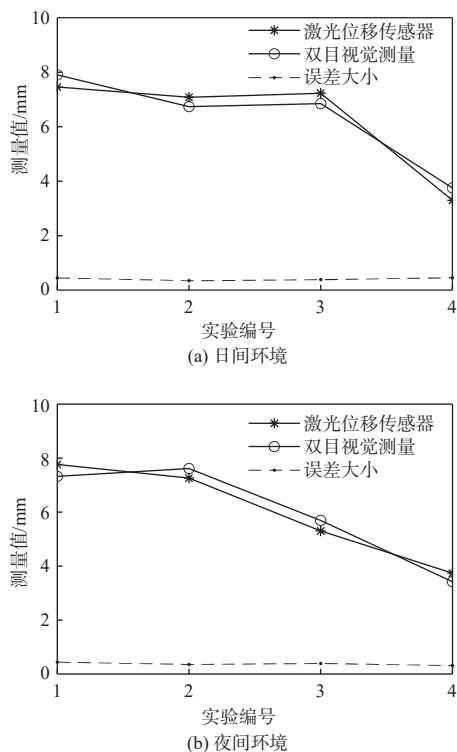


图 14 测量结果与误差曲线

Fig. 14 Measurement results and error curves

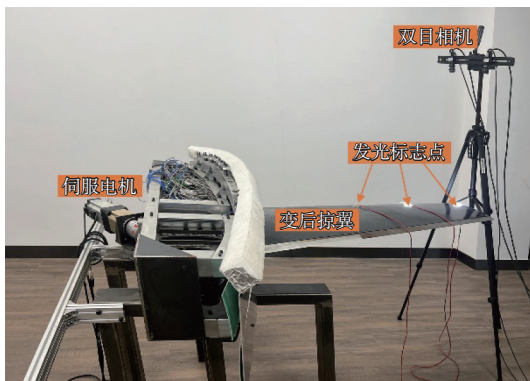


图 15 机翼偏转角测量示意图

Fig. 15 Diagram of wing deflection angle measurement

实验过程中通过 Labview 控制伺服电机带动机翼匀速偏转, 读取伺服电机 16 bit 编码器的数值解算机翼的旋转角度作为真实值。将双目相机的帧率设置为 500 帧/s, 采集图像解算标志点的空间坐标。同样, 分别在模拟的光线不均匀 (有阴影) 环境和光线不足 (夜间) 环境下进行实验。

获得三维坐标后, 基于最小二乘法拟合旋转中心和旋转半径。基于半径约束构建拉格朗日约束方程^[21], 问题即转换为在式 (7) 约束下的最优化问题。式 (7) 中: (x_0, y_0, z_0) 为旋转中心的坐标; (x_i, y_i, z_i) 为解算出的三维坐标; R 为旋转半径; λ 为拉格朗日乘子; A 、 B 、 C 、 D 为约束平面的参数。基于最小二乘法, 最终可以确定旋转中心和旋转半径。

$$\mathcal{L} = \sum_{i=1}^N [(x_i - x_0)^2 + (y_i - y_0)^2 + (z_i - z_0)^2 - R^2]^2 + \lambda (Ax_0 + By_0 + Cz_0 + D) \quad (7)$$

图 16 为拟合空间圆示意图。取采集到的第一个点作为起始点, 求其他点向量的点积, 画出如图 17

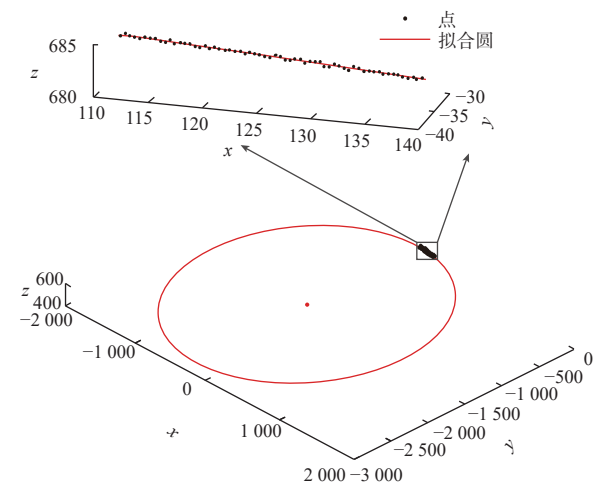


图 16 拟合空间圆示意图

Fig. 16 Diagram of the fitted spatial circle

所示的偏转角度随时间的变化曲线。共测量10次,得到表4所示数据。

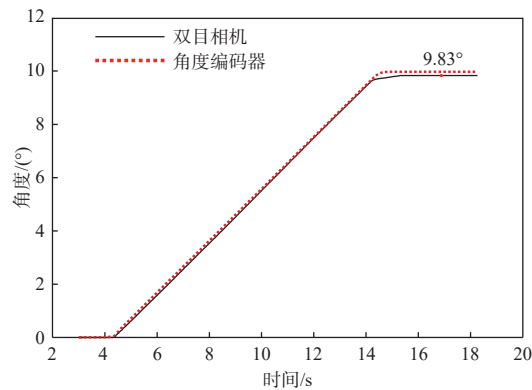


图 17 测量偏转角度随时间的变化曲线
Fig. 17 Variation of the measured deflection angle with time

表 4 偏转角测量结果				
Table 4 Deflection angle measurement results				
环境条件	角度传感器 测定偏转角/(°)	拟合圆 半径/mm	双目测定 偏转角/(°)	角度 误差/(°)
日间光线 不均匀环境	10.00	1 420.7	9.79	0.21
	10.00	1 419.5	9.79	0.21
	10.00	1 412.4	9.86	0.14
	5.00	1 496.9	4.74	0.26
	5.00	1 494.0	4.90	0.10
夜间光线 不足环境	10.00	1 395.3	9.96	0.04
	10.00	1 452.9	9.56	0.44
	10.00	1 412.7	9.83	0.17
	5.00	1 456.6	4.83	0.17
	5.00	1 562.1	4.73	0.27

从图 17 和表 4 可以看出,通过本系统测得的偏转角能较好地还原实际情况。不同光照条件下,5°和10°两种偏转角度的测量误差均控制在0.5°以内,进一步验证了主动发光标志点在复杂光照环境下的优势。从图 17 的时域曲线可以观察到,测得的角度变化平滑连续,未出现明显跳变,说明系统能够准确捕捉机翼的动态偏转过程。

4 结论

本研究提出了一种基于主动发光标志点的机翼变形双目视觉测量方法。该方法通过优化标志点设计和改进图像处理算法,显著提升了系统的实时性能。在测量精度方面,基于小孔成像原理和误差理论构建了系统误差计算模型,为双目系统的位移精度估算提供了理论依据。采用高精度

激光位移传感器进行标定验证,实验结果表明:在使用 720×540 像素低分辨率黑白相机,曝光时间为 15 μs 的条件下,该方法在 800 mm~1 300 mm 测量范围内实现了优于 0.5 mm 的位移精度和 0.44°的角度精度,且在 150 Hz 及以下的动态测量中与激光位移传感器的测量结果保持了 0.97 以上的相关性。针对实际飞行中常见的复杂光照环境,在曝光时间 15 μs 条件下开展了曝光不足和光照不均匀工况实验,测得位移精度分别为 0.41 mm 和 0.38 mm,验证了该方法在复杂飞行环境下的测量鲁棒性。相较于现有研究,本方法不仅降低了对测试环境和设备的要求,还具有更强的实时处理能力,为工程实践中机翼气动弹性变形的高精度测量提供了可行的方案。

未来研究将围绕三个方向深入开展:一是结合轻量型神经网络算法,进一步提升系统测量精度;二是通过实际飞行试验验证本文算法的性能,重点关注雨、雾、雪等恶劣天气条件下的测量效果;三是优化系统设计以增强其环境适应性,推进该技术在工程实践中的规模化应用。

参考文献:

[1] 贺济洲,叶正寅. 机翼弹性变形对气动特性的影响[J]. 航空计算技术, 2010, 40(4): 7-10.
HE Jizhou, YE Zhengyin. Influence of wing elastic deformation on aerodynamic characteristics[J]. Aeronautical Computing Technique, 2010, 40(4): 7-10.

[2] 王晋军,伍康. 机翼弹性变形对气动特性影响的实验研究[J]. 空气动力学学报, 2007(1): 55-59.
WANG Jinjun, WU Kang. Experimental study on the effect of wing elastic deformation on aerodynamic characteristics[J]. Acta Aerodynamica Sinica, 2007(1): 55-59.

[3] 马铁林,马东立,张华. 大展弦比柔性机翼气动特性分析[J]. 北京航空航天大学学报, 2007(7): 781-784.
MA Tielin, MA Dongli, ZHANG Hua. Aerodynamic analysis of flexible wing with large aspect ratio[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2007(7): 781-784.

[4] 李生生,朱庆渝. 国产箔式应变片在高速风洞试验中的应用[J]. 气动实验与测量控制, 1987(3): 72-77.
LI Shengsheng, ZHU Qingyu. Application of domestic foil strain gauge in high-speed wind tunnel test[J]. Aerodynamic Experiment and Measurement Control, 1987(3): 72-77.

- [5] 安文倩, 朱目成, 聂诗良. 基于风洞的电容式加速度计检测电路设计[J]. *电脑知识与技术*, 2011, 7(13): 3166-3168.
- AN Wenqian, ZHU Mucheng, NIE Shiliang. Design of capacitive accelerometer detection circuit based on wind tunnel[J]. *Computer Knowledge and Technology*, 2011, 7(13): 3166-3168.
- [6] 侯乔乔, 张清勇. 基于空间曲面插值的机翼形变实时显示方法研究[J]. *工程与试验*, 2019, 59(1): 36-37.
- HOU Qiaoqiao, ZHANG Qingyong. Real-time display method of wing deformation based on spatial surface interpolation[J]. *Engineering and Test*, 2019, 59(1): 36-37.
- [7] LIU Y, GE Z D, YUAN Y T, et al. Wing deformation measurement using the stereo-vision methods in the presence of camera movements[J]. *Aerospace Science and Technology*, 2021(119): 107161.
- [8] 徐洋, 陈磊, 许晓斌, 等. 高超声速风洞下的双目视觉测量技术研究[J]. *光电与控制*, 2022, 29(2): 72-75.
- XU Yang, CHEN Lei, XU Xiaobin, et al. Research on binocular vision measurement technology in hypersonic wind tunnel[J]. *Electrics Optics and Control*, 2022, 29(2): 72-75.
- [9] 胡丙华, 晏晖. 直升机旋翼三维动态变形测量与可视化分析[J]. *应用光学*, 2023, 44(1): 159-167.
- HU Binghua, YAN Hui. 3D dynamic deformation measurement and visualization analysis of helicopter rotor[J]. *Journal of Applied Optics*, 2023, 44(1): 159-167.
- [10] 刘燕. 高亚音速下机翼变形摄像测量研究[D]. 西安: 西北工业大学, 2020.
- LIU Yan. Research on camera measurement of wing deformation at high subsonic speed[D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2020.
- [11] BODEN F, LAWSON N, JENTINK H W, et al. Advanced in-flight measurement techniques[M]. Berlin: Springer Berlin Heidelberg, 2013: 57-72.
- [12] HUANG X C, WANG X F, TENG Q Z, et al. Degradation type-aware image restoration for effective object detection in adverse weather[J]. *Sensors*, 2024, 24(19): 6330.
- [13] 周骛, 王芳婷, 王宵宵, 等. 基于双目视觉多曝光的粒子轨迹测速方法研究[J]. *光学学报*, 2021, 41(12): 154-162.
- ZHOU Wu, WANG Fangting, WANG Xiaoxiao, et al. Particle streak velocimetry method based on binocular vision and multiple exposure[J]. *Acta Optica Sinica*, 2021, 41(12): 154-162.
- [14] 张丽芳, 周军. 利用多曝光对图像进行动态范围增强[J]. *数据采集与处理*, 2007(4): 417-422.
- ZHANG Lifang, ZHOU Jun. Dynamic range enhancement of images using multiple exposures[J]. *Journal of Data Acquisition and Processing*, 2007(4): 417-422.
- [15] 李超, 贾永兴, 王华力, 等. 一种融合色彩和亮度信息补偿的图像预处理方法[J]. *通信技术*, 2020, 53(9): 2154-2158.
- LI Chao, JIA Yongxing, WANG Huali, et al. An image preprocessing method for fusion color and luminance information compensation[J]. *Communications Technology*, 2020, 53(9): 2154-2158.
- [16] MUKHERJEE J, PRAVEEN K, MADUMBU V. Visual quality enhancement of images under adverse weather conditions[C]//2018 21st International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC). Maui, HI, USA: IEEE, 2018: 3059-3066.
- [17] KULKARNI A, MURALA S. Wipernet: a lightweight multi-weather restoration network for enhanced surveillance[J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2022, 23(12): 24488-24498.
- [18] 张广军. 视觉测量[M]. 北京: 科学出版社, 2008: 67.
- ZHANG Guangjun. Vision measurement[M]. Beijing: Science Press, 2008: 67.
- [19] WU X Y, XU Z W. Binocular vision monitoring method research of wing sweep angles for morphing aircraft in complex climate environments[J]. *Measurement*, 2023(218): 113214.
- [20] AHN S J, WARNECKE H J. Systematic geometric image measurement errors of circular object targets: mathematical formulation and correction[J]. *Photogrammetric Record*, 1999, 16(93): 485-502.
- [21] 张曦, 朱永吉, 兰浩, 等. 基于半径约束的空间圆拟合算法及其花键装配上的应用[J]. *计量与测试技术*, 2019, 46(6): 69-72.
- ZHANG Xi, ZHU Yongji, LAN Hao, et al. Space circle fitting algorithm based on radius constraint and its application in spline assembly[J]. *Metrology and Measurement Techniques*, 2019, 46(6): 69-72.