

# 基于立体视觉技术的无人机左右机翼高度差检测

冯诗源<sup>1</sup>, 聂廷晋<sup>2</sup>

(1. 武警后勤学院 后勤保障系, 天津 300309;

2. 武警工程大学 信息工程学院, 陕西 西安 710086)

**摘要:** 无人机长时间在复杂的战场环境作业会对左右机翼高度差产生影响, 导致飞行过程中产生失速、失准、续航降低等现象。针对检测无人机左右机翼高度差方法的缺失, 提出一种智能化非接触式的左右机翼对称点高度差检测方案。基于立体视觉技术, 提取无人机尾部图像, 并识别无人机左右机翼角点, 通过计算得到左右对称点高度差, 解决了人工检测精度低的问题。

**关键词:** 运输投送; 无人机; 立体视觉; 机翼高度差

中图分类号: U472.9

文献标志码: A

文章编号: 2097-3853(2026)01-0011-06

## Height difference detection of left and right wings of UAV based on stereo vision technology

FENG Shiyuan<sup>1</sup>, NIE Tingjin<sup>2</sup>

(1. Logistics Support Department, Logistics University of People's Armed Police Force, Tianjin 300309, China;

2. Information Engineering Institute, Engineering University of People's Armed Police Force, Xi'an 710086, China)

**Abstract:** Long-term operation of the UAV in a complex battlefield environment will affect the height difference between the left and right wings, resulting in stall, misalignment, and reduced endurance during flight. Aiming at the lack of methods to detect the height difference between the left and right wings of the UAV, an intelligent non-contact detection scheme of the height difference between symmetry points of both wings is proposed. Based on stereo vision technology, the tail image of the UAV is extracted, and the corner points of both wings of the UAV are identified. The height difference between the left and right symmetrical points is calculated, which solves the problem of low manual detection accuracy.

**Keywords:** transport and delivery; UAV; stereo vision; wing height difference

无人机作为担负部队运输投送任务的重要载运工具, 长期工作于复杂且恶劣的战场环境中, 若存在长时间机动过载、作战损伤、材料疲劳等现象, 将会导致机翼或连接结构发生永久性形变、松动或失效, 对左右机翼高度差造成影响, 从而出现飞行过程中失速、失准、续航降低等现象, 大大降低部队运输投送和作战能力。目前检测无人机左右机翼高度差多为人工采用测量尺或标杆等工具进行测量, 精度低且耗时费力。为了适应现代化战场灵活多变的作战态势, 针对目前无人机左右机翼高度差检测方案的缺失, 提出一种智能化的

检测方案保障无人机的机动性能是十分必要的。研究文献资料发现, 目前鲜有应用于无人机左右机翼高度差的智能化检测方案。

视觉检测作为一种非接触式检测方法, 因其检测精度高以及检测系统易于布置, 已经被广泛应用于多个领域。宿真平等<sup>[1]</sup>针对果蔬采购中人工检测成本高效率低的问题, 提出了基于YOLOv5目标检测算法检测生鲜果蔬瑕疵, 经过算法训练, 该检测方法能够高效、精准地识别果蔬瑕疵。崔永强等<sup>[2]</sup>针对低空安防领域中无人机“黑飞”“乱飞”等安全威胁问题, 提出了利

收稿日期: 2025-06-24

第一作者简介: 冯诗源(1994—), 男, 辽宁铁岭人, 讲师, 博士, 研究方向: 载运工具智能化检测、交通安全。

用视觉技术实现无人机快速定位的 SORT 算法 (simple online and realtime tracking), 实现动态轨迹追踪, 在最远距离 1 km、最大飞行速度 23 m/s 的极限条件下, 对无人机目标的识别准确率达 97.6%。郭志军等<sup>[3]</sup> 针对校园智能清扫车障碍物检测精确度低、检测速度慢等问题, 提出一种障碍物检测与测距算法, 大幅度提高了检测精度与检测速度等问题。上述研究进一步证实了立体视觉技术已广泛应用于多领域当中, 且检测精度良好。

在车辆工程领域, 吉林大学的张立斌团队<sup>[4-5]</sup> 提出了应用计算机图像处理技术, 提取车辆尾部灯光轮廓形心检测车身左右对称点高度差的检测方法, 通过检测系统自发搜寻车身左右对称点, 检测速度快、精度较高, 但对车辆尾部灯光轮廓完整性和检测场地光线要求较高。刘广等<sup>[6]</sup> 设计了一种车身高度差检测装置, 通过前后支架与安装在支架上的激光器相互配合, 观察激光器发射的激光在刻度尺上的照射位置判断车身对称部位高度差。该装置结构稳定、操作便利, 但检测的核心操作需要人为进行, 同时检测装载包含大量运动机械部件, 长期使用易出现磨损, 测量车型存在局限性等问题。徐观等<sup>[7]</sup> 设计了一种基于车身点云特征的汽车车身左右对称点检测方法。该方法自动化程度及检测效率高、适配车辆范围广, 但成本较高, 对硬件算力与算法依赖程度高, 且存在因点云数据缺失造成测量误差的风险。

综上, 本课题借助立体视觉技术在车辆等工程领域的成果, 提出一种利用立体视觉技术检测无人机左右机翼高度差的方案。首先对所用工业相机进行图像标定; 然后采集无人机后视图图像进行图像处理, 提取左右机翼角点像素坐标, 通过像素坐标值分析换算得到左右机翼高度差, 得到检测结果。

## 1 相机标定与图像采集

### 1.1 相机标定

相机的摄像头由于制造工艺等原因, 在拍摄图像的过程中会使图像产生畸变。为了降低畸变, 需要建立空间物体表面某点与图像中对应点的几何模型, 该过程被称之为相机标定。

张正友提出的张氏标定法<sup>[8]</sup>, 不仅简化了标定流程, 而且能够保证标定精度, 在图像采集与处理领域被广泛应用。因此本研究选用张氏标定法对相机进行标定, 相机标定所用的棋盘格图像如图 1 所示。

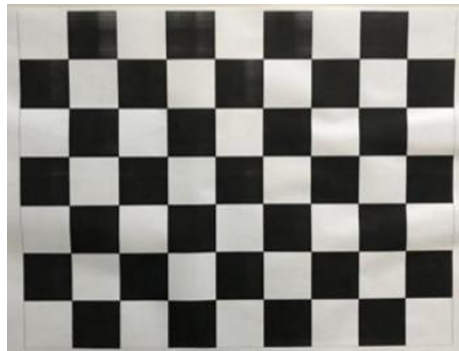


图 1 标定用棋盘格细目照

Fig.1 Checkerboard detail for calibration

棋盘格由边长 60 mm 的黑白相间方格组成, 阵列 9×7, 精度为 ±0.001 mm。为尽可能遍历相机所有的角度, 拍摄了 9 张不同方向的棋盘格照片对相机进行标定, 不同的拍摄角度如图 2 所示。



图 2 棋盘格图像采集

Fig.2 Chessboard image acquisition

考虑镜头畸变的影响, 采用 LM 算法<sup>[9]</sup> 对标定参数进行非线性优化。LM 算法通过设置调节因子根据梯度变化选择不同寻优方式, 使代价函数不易陷入局部最优, 该算法还能提供准确的步长, 局部收敛较快。

在标定过程中, 需要获取相机的内参数矩阵  $G$ , 径向畸变系数  $[k_1, k_2, k_3]$  和切向畸变系数  $[p_1, p_2]$ 。标定结果如表 1 所示。

表 1 单目相机标定参数

Tab.1 Calibration parameters of monocular camera

参数名	参数值
$G$	$\begin{bmatrix} 1\ 679.917\ 1 & 0 & 964.295\ 1 \\ 0 & 1\ 680.392\ 2 & 602.193\ 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$
$[k_1, k_2, k_3]$	$[-0.133\ 73\ 0.114\ 65\ -0.000\ 67]$
$[p_1, p_2]$	$[0.000\ 0.000\ 3]$

为直观反映相机标定参数的稳定度,本研究进行了 5 次重复标定试验。对 5 次标定试验所得参数进行离散化分析,若相机离散系数均处于 0.001~0.005 之间,说明数据的集中性好,进而说明相机标定准确,相机内参数稳定,能反映相机的固有属性;若参数大于 0.005 说明标定误差较大,需要调整进行重复试验或更换相机。

将 5 次重复试验数据代入式(1)。

$$c_v = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \mu)^2}{N}} \bigg/ \frac{\sum_{i=1}^N x_i}{N} \quad (1)$$

式中, $c_v$  表示离散分析结果, $x_i$  为第  $i$  个离散数据, $\mu$  为所有  $x_i$  的均值。

求得张氏标定算法获取的标定参数的离散系数如表 2 所示。其中, $f_x, f_y$  分别表示相机镜头焦距  $f$  在图像像素坐标系  $u$  和  $v$  轴上的表达, $u_0$  和  $v_0$  分别代表相机光轴与图像平面的交点。

从表 2 可见,相机离散系数均处于 0.001~0.005,说明相机标定准确,相机内参数稳定,能反映相机的固有属性。

表 2 棋盘格标定算法试验数据离散性

Tab.2 Experimental data discreteness of chessboard calibration algorithm

相机参数	数据离散系数
$f_x$	$3.137\ 8 \times 10^{-3}$
$f_y$	$3.708\ 6 \times 10^{-3}$
$u_0$	$3.069\ 5 \times 10^{-3}$
$v_0$	$4.844\ 1 \times 10^{-3}$

## 1.2 图像处理

工业相机采集到的图像拥有大量的像素点,

过多的像素信息会降低图片处理的速度。本研究仅关注无人机机翼部分的图像情况,可以利用 Halcon 软件去除无用的背景信息,保留检测需要的图像信息,并将图像背景转化为与机身色彩形成明显对比的白色背景,易于进行机翼角点提取。处理后的图像如图 3 所示。



图 3 Halcon 软件处理后的无人机图片

Fig.3 UAV images processed by Halcon software

目前绝大部分相机采集的彩色图像都是 RGB 模式图像,每个像素点由红、绿、蓝 3 色按照不同的比例分量组合而成。为了提升图像处理速度,保留图像的特征与亮度变化,对所采集图像进行灰度处理。灰度处理后的图像如图 4 所示。

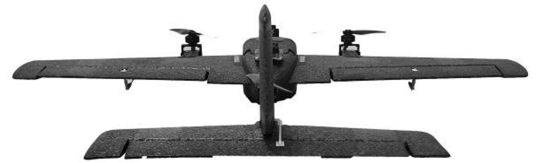


图 4 灰度图像处理

Fig.4 Image grayscale processing

受相机制造工艺和拍摄现场环境干扰等问题,使用工业摄像机采集的图像中会掺杂各种噪声,主要包括高斯和脉冲两种。高斯噪声可采用高斯低通滤波对图像进行模糊处理。从本质上讲,高斯滤波通过一个掩膜扫描图像中的像素,用模板邻域内灰度值的加权平均表示模板中心的灰度值,实现图像的平滑与模糊,高斯掩膜服从高斯分布,即临近像素占比更大。通过掩膜与图像卷积操作实现图像的平滑、去除噪声。脉冲噪声也称椒盐噪声,由于脉冲噪声灰度值与邻域灰度值差别较大,去除脉冲噪声一般采用中值滤波器滤波方法,将临近的像素按照大小排列,取序号在中间的像素值作为滤波后像素值<sup>[10]</sup>。

为保证相机拍摄图像的质量,向图像中添加高斯噪声和脉冲噪声,对图像进行滤波处理,由处理效果决定选择哪种滤波器,噪声添加与滤波效果如图 5 所示。图 5(a)和图 5(b)分别为添加两种噪声后的效果图。分别利用高斯滤波和中值滤

波对图片进行降噪处理。由滤波效果可以看出, 高斯滤波对于噪声的去除不够彻底, 如图 5(c) 和图 5(e) 所示, 而中值滤波在保留飞机外形特征的同时, 能够很好的应对两种不同的噪声, 如图 5(d) 和图 5(f) 所示。故选用中值滤波对图像进行滤波处理。

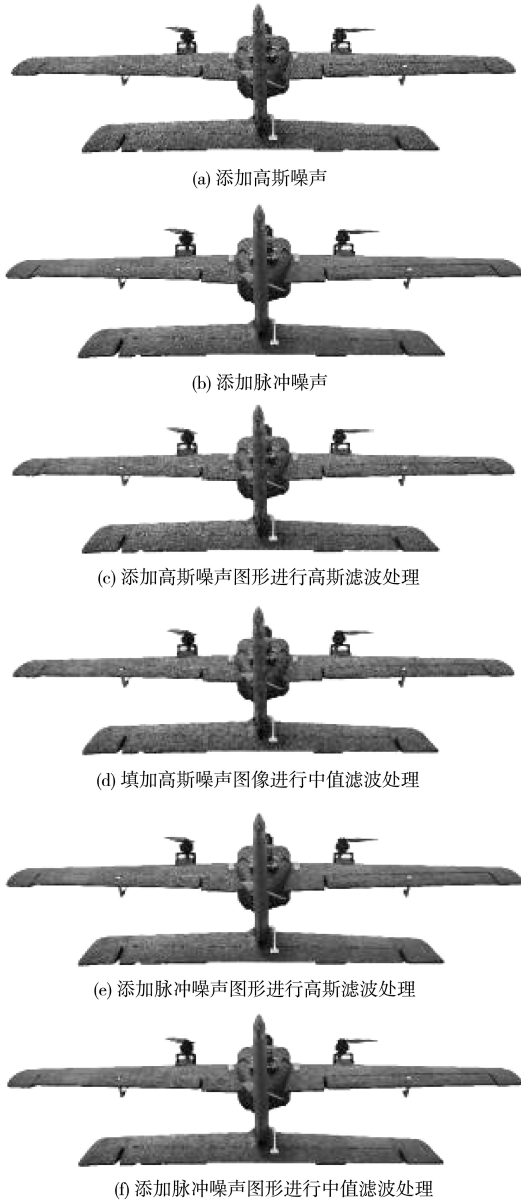


图 5 图像噪声处理

Fig.5 Image noise processing

图像滤波处理后, 应用 Blob 分析算法对所采集图像进行冲击滤波, 使得图像采集区域与图像背景的灰度值产生较为明显的区别, 进而方便机翼角点信息的提取, 冲击滤波后的图像如图 6 所示。



图 6 冲击滤波处理

Fig.6 Shock filtering processing

应用基于高低阈值 Canny 算子提取拍摄图像边缘特征点。图像中灰度值的变化情况是反映边界特征的重要信息, 梯度幅值与梯度方向的计算公式为:

$$G(x, y) = \sqrt{G_x^2(x, y) + G_y^2(x, y)} \quad (2)$$

$$\theta = \arctan(G_y(x, y) / G_x(x, y)) \quad (3)$$

式中,  $G(x, y)$  为梯度幅值,  $\theta$  为梯度方向,  $G_x(x, y)$  与  $G_y(x, y)$  分别表示像素点  $(x, y)$  处分别沿  $X$  与  $Y$  方向的梯度信息。

随后对采集图像进行非极大值抑制算法处理, 进一步突出特征点并剔除非边缘信息点。最后对梯度幅值设定高、低阈值, 对边缘进行双阈值判别, 判定真实边缘, 确定无人机左右机翼角点。

## 2 无人机左右高度差检测

### 2.1 无人机左右机翼高度差检测系统组成

检测系统硬件包括: 1 台高速工业摄像机, 帧率 30 fps, 230 万像素, 视场角  $84.8^\circ \times 68^\circ \times 98.4^\circ$ , 配 8 mm 焦距镜头,  $4.8 \mu\text{m} \times 4.8 \mu\text{m}$ , 230 万像素 ( $1920 \times 1200$ ), 信噪比 38 dB, 支持软件与硬件触发, 采用 USB 供电模式, 所用高速工业摄像机如图 7 所示。



图 7 所用工业摄像机

Fig.7 Industrial camera used

另搭配 1 台工业控制计算机, EPE-1816 型号主板兼容英特尔六代、七代处理器; 1 对光电传感器。检测软件系统基于 Windows 7 操作系统设计, 所有功能在 VC++ 中实现, 其中相机标定部分

调用 Matlab 实现,图像处理部分使用 Halcon 算法包实现。

## 2.2 检测流程

选用 Heewing 无人机为试验检测机,在光线良好、地面平整的场地进行试验。检测前对所用摄像机进行标定、调平。调试无人机机翼左右检测系统,录入待检测无人机的型号。标定与调平完成后,无人机停放于待检测区域。当系统识别到待检测无人机后,启动相机采集图像,摄像机开始采集无人机尾部图像。同时工业控制计算机内部的检测程序根据摄像机所采集的图像,采用计算机图像处理技术,对无人机左右机翼轮廓进行提取并重建二维坐标,提取左右机翼对称角点,通过计算左右机翼两对称角点纵向坐标差值的绝对值得到无人机左右机翼高度差数据。

在摄像机采集无人机机翼图像传递给工业控制计算机后,计算机通过识别图像的边缘特征进而提取无人机左右机翼角点。记无人机左右机翼角点的像素坐标分别为 $(x_l, y_l)$ 和 $(x_r, y_r)$ 。

## 2.3 检测试验结论

由工业摄像机采集到的无人机左右机翼图像信息传递给检测系统后,得到无人机左右机翼对称角点像素点图像坐标,试验完成后的飞人机左右机翼对称角点像素点坐标检测提取如图 8 所示,左右机翼对称角点像素点坐标分别为 $(35, 541)$ 和 $(3\ 875, 550)$ 。通过计算 $y_l$ 和 $y_r$ 差值的绝对值,即可得到左右机翼高度差。左右机翼对称点像素坐标差值为 9。由图像采集系统获取的图像宽度为 680 像素,高度为 192 像素,分辨率为 150 像素/英寸,通过换算可得 9 个像素单位长度约等于 1.52 mm。故本次所检测试验所得无人机左右机翼对称角点的高度差值为 1.52 mm。

按照上述试验流程,采用试验机型进行 5 次重复试验,记录每次检测无人机左右机翼对称角点像素值的横纵坐标。检测结果如表 3 所示。对表 3 中的左右机翼纵坐标像素点取平均值和方差,计算结果如表 4 所示。结合表 3 与表 4 中的 5 次试验与左右机翼纵坐标均值和方差数据进行分析可知,左侧机翼高度略低于右侧机翼高度,说明无人机在执飞过程中多次存在向左倾斜的飞行姿态,导致左侧机身部件存在应力疲劳的趋势。试验结果也会受地面不平整度影响,为了保证试验的准确性,可以选择多处较为平整地面进行多次重复试验,通

过求均值的方式得到最终结果。从方差来看,5 次重复试验数据的波动性较小,说明该方法能够有效检验无人机左右机翼对称点高度差。

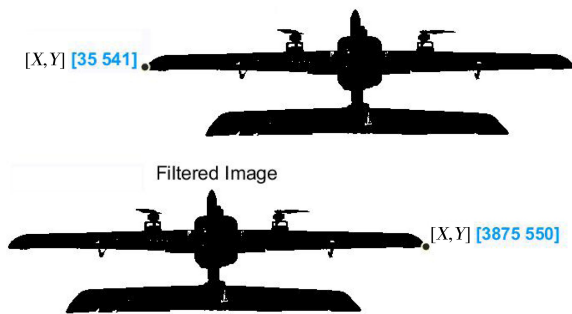


图 8 左右机翼对称点坐标示意图

Fig.8 Coordinate diagram of symmetry points of left and right wings

从表 4 中提取左右侧机翼纵坐标均值计算可得两侧机翼对称点纵坐标的差值为 8.2 个像素单位,换算后左右机翼对称点高度差约为 1.52 mm。

表 3 试验机左右机翼对称角点像素横纵坐标试验数据  
Tab.3 Test data of horizontal and vertical coordinates of symmetrical corner pixels on left and right wings of testing UAV

左侧横坐标	左侧横坐标	左侧横坐标	左侧横坐标
35	541	3 875	550
35	541	3 875	550
35	541	3 875	550
35	541	3 875	550
35	541	3 875	550

表 4 试验机左右机翼对称角点像素纵坐标均值与方差  
Tab.4 Mean and variance of pixel ordinates of symmetrical corner points on left and right wings of testing UAV

左侧机翼纵坐标均值	左侧机翼纵坐标方差	右侧机翼纵坐标均值	右侧机翼纵坐标方差
541.2	0.56	549.4	1.04

## 3 结束语

针对现有无人机左右机翼对称点高度差智能检测方案的缺失,提出一种应用立体视觉技术提取无人机左右机翼角点,通过计算左右角点高度

差绝对值的方式,求解左右机翼高度差的检测方案。选用张氏标定法对相机进行标定,应用多次重复试验检验标定稳定性,通过求解相机主要参数的离散系数,检验标定效果。提出利用 Haclon 软件剔除图像中多余信息,为加快图像计算处理速度对采集的图像进行灰度处理,应用中值滤波去除图像中的噪声;应用 Blob 分析算法进行冲击滤波,增强图像与背景区域的灰度对比,方便机翼角点信息的采集;基于高低阈值 Canny 算子提取拍摄图像边缘特征点,选取非极大值抑制法突出特征点并剔除非边缘信息点;设定高、低阈值,判定真实边缘,确定无人机左右机翼角点。

基于立体视觉技术的无人机左右机翼高度差

检测系统对于作业环境有较为严格的要求,检测场地光线的辐照度、地面平整度和作业环境是否有震感都会影响检测结果。相比于传统的人工测量,该方法在受控良好的环境下,系统能够自动获取左右机翼对称角点,获取精度高,且测量误差小。

本课题基于理想的战现场后方环境进行研究,可以为无人机左右机翼高度差检测提供参考与理论依据。此外,该方法还可以应用于战斗机、运输机、直升机等机型的检测。为了适应前方战场的实际需求,未来会基于复杂的战现场环境对检测系统的适应性以及检测系统多传感器融合、嵌入式部署等方式进行更为深入的研究。

## 参考文献:

- [1] 宿真平,周凌,周长嵘. 机器视觉检测技术在果蔬采购中应用研究[J]. 产业创新研究,2025(14):102-104.
- [2] 崔勇强,周威任,毛智鹏,等. 基于智能视觉检测与语义分析的反无人机实时预警系统[J/OL]. 南京信息工程大学学报,2025:1-10(2025-06-04)[2025-06-20]. <https://link.cnki.net/doi/10.13878/j.cnki.jnuist.20250402005>.
- [3] 郭志军,叶世文,庞明天,等. 改进 YOLOv8s 的校园智能清扫车障碍物检测与测距算法[J]. 电子测量技术,2025,48(10):33-41.
- [4] 张立斌,冯诗源,王艺鹏,等. 一种基于立体视觉的汽车车身左右高度差检测装置及方法;CN114199141A[P]. 2022-03-18.
- [5] ZHANG L B, FENG S Y, SHAN H Y, et al. Tractor-trailer-train braking time sequence detection based on monocular vision[J]. Advances in Mechanical Engineering, 2021, 13(12):16878140211067045.1-13.
- [6] 刘广,许嘉龙,郭小岩,等. 车身高度差测量装置;CN218380784U[P]. 2023-01-24.
- [7] 徐观,蔡鹏亮,李晓韬,等. 基于汽车车身点云特征的车身高度差检测方法与系统;CN117870558A[P]. 2024-04-12.
- [8] ZHANG Z. A flexible new technique for camera calibration[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2000, 22(11):1330-1334.
- [9] 董缘缘. 基于遗传算法与 LM 算法的摄像机标定方法研究[D]. 杭州:浙江工业大学,2016.
- [10] 王冠然. 基于单目视觉的汽车列车制动时序检测方法研究[D]. 长春:吉林大学,2021.

(责任编辑:方素华)