

文章编号 1004-924X(2024)14-2166-23

基于单目视觉的火箭回收高度测量技术研究

路 荣^{1,2}, 张高鹏^{1,2*}, 曹剑中^{1,2}, 陈卫宁^{1,2}, 郭惠楠^{1,2}, 张海峰^{1,2},
张 哲^{1,2}, 梅 超^{1,2}, 关 蕾^{1,2}

(1. 中国科学院大学, 北京 100049;

2. 中国科学院 西安光学精密机械研究所, 陕西 西安 710019)

摘要:精确测量火箭实时高度是完成火箭回收任务的重要前提之一, 为了实现对火箭高度的实时测量, 本文对基于单目视觉的火箭回收高度测量技术进行了研究。首先针对火箭回收过程中的烟雾场景, 在何凯明暗通道去雾算法的基础上, 结合视网膜大脑皮层(Retinex)理论对透射率函数进行改进, 从而提升了去雾算法对不同雾环境下的适应性。其次, 针对火箭回收中靶点的特性, 提出了适用于靶点特征提取的算法, 并设计实验验证了算法的可行性与可靠性。针对火箭与地面靶点的几何特性构建了数学模型, 并设计实验定量分析了高度解算算法的可行性。最后定量分析了不同雾浓度下不同去雾算法对高度测量结果的影响。仿真和实物实验结果表明, 根据本文提出方法计算得到的火箭高度解算精度在 0.5 m 以内, 可满足火箭回收中对高度测量的需求。

关键词:火箭回收; 单幅图像去雾; 质心提取; 高度解算; 单目视觉

中图分类号: TP391.41 **文献标识码:** A **doi:** 10.37188/OPE.20243214.2166

Research on measurement technology of rocket recovery height based on monocular vision

LU Rong^{1,2}, ZHANG Gaopeng^{1,2*}, CAO Jianzhong^{1,2}, CHEN Weining^{1,2}, GUO Huinan^{1,2},
ZHANG Haifeng^{1,2}, ZHANG Zhe^{1,2}, MEI Chao^{1,2}, GUAN Lei^{1,2}

(1. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

2. Xi'an Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710019, China)

* Corresponding author, E-mail: zhanggaopeng@opt.ac.cn

Abstract: Accurate measurement of rocket height is one of the important preconditions to complete the rocket recovery task. In order to realize the real-time measurement of rocket height, the rocket recovery height measurement technology was studied based on monocular vision. Firstly, in view of the smoke scene in the process of rocket recovery, the transmission function was improved based on the He Kai light-dark channel de-fogging algorithm in combination with Retinex theory, so as to improve the adaptability of the de-fogging algorithm to different fog environments. Secondly, according to the characteristics of target in rocket recovery, an algorithm suitable for target feature extraction was proposed, and the feasibility and reliability of the algorithm were verified by experiments. According to geometric characteristics of the rocket and the ground target, the mathematical model is built, and feasibility of the altitude algorithm is

收稿日期: 2023-12-22; 修订日期: 2024-02-20.

基金项目: 国家自然科学基金(No. 51905529); 中国科学院青年创新促进会会员项目(No. 2022410)

analyzed quantitatively by designing experiments. Finally, the influence of different defogging algorithms on the height measurement results under different fog concentrations is quantitatively analyzed. The simulation and experimental results show that the accuracy of rocket height calculated by the proposed method is within 0.5 m, which can meet the demand of height measurement in rocket recovery.

Key words: rocket recovery; single image de-fogging; centroid extraction; height calculation; monocular vision

1 引 言

重复使用运载火箭能够有效降低火箭的发射成本与时间成本、减少残骸危害、提升火箭的发射频率。目前火箭回收可分为伞降回收、垂直降落以及带翼飞回三种技术^[1]。伞降回收技术方面,我国具有了返回式卫星与神舟系列飞船返回回收的技术积累,基础相对较好。国外降落伞减速回收技术在助推器回收中的应用,起源于美国的航天飞机助推器回收,经过几十年的发展,积累了相对成熟的技术基础。带翼飞回技术的设计思想起源于航空领域飞机的水平着陆,不同点在于火箭助推器完成空间载荷投送使命后高速再入大气层,飞行马赫数远大于飞机。由于目前大部分进入空间的运载火箭均为旋成体外形,因此该项技术途径在运载火箭助推器回收领域发展相对缓慢。

目前国内外投入大量研究的是垂直降落回收火箭回收技术,该技术具有落点位置可控、可靠性高,是目前主流的回收方式。当前美国太空探索公司(SpaceX)在垂直回收技术上已经较为成熟,中国深蓝航天^[2]公司自主研发的“星云-M”1号试验箭目前完成了1公里级垂直起飞和降落飞行试验。其中一次性运载火箭子级助推器落点的控制与垂直回收技术^[3]的研究尤为重要,其关键技术是要精确解算火箭与地面目标点之间的高度。但是,助推过程中箭体产生的烟雾与抖动往往会对高度解算的精度有影响,而烟雾对成像设备的影响最为严重,直接导致目标点模糊甚至丢失。以往的去雾方法大多数集中在对地面和天空环境去雾研究,针对箭体回收过程中雾对回收精度产生影响的问题,目前的研究还尚不充分。

针对以上问题,本文首先对成像设备采集的图像做去雾处理,在去雾方面,本文考虑到算法的简洁性以及高效性,采用传统去雾算法进行处

理,传统的图像去雾方法一般分为两类,一类是以图像增强为主的去雾方法,典型的代表有Retinex^[4]图像增强理论、直方图均衡化算法、小波法等。另一类是以图像复原为主,典型的代表是何凯明的暗通道^[5]去雾算法,Tan^[6]极大化局部对比度,Fattal^[7]独立成分分析法等。单一的图像复原和图像增强算法在对单幅图像处理时无法对特征区域增强,且图像增强原理只是对图像的亮度和暗区域进行增强,但对于存在薄雾和浓雾的图像处理效果不佳。图像复原方法可有效去除薄雾的影响,并且非局部^[8](Non-Local)先验算法的去雾方法能有效解决局部雾的影响,减小光照的影响。暗通道去雾算法所获得的图像并没有突出图像细节,这并不利于我们之后做目标检测,并且暗通道去雾方法受光照和局部雾的影响较大,图像会出现光晕现象且对全天时目标检测的图像预处理效果不佳。Tan基于无雾图像的对对比度比有雾图像的对对比度要高的事实,通过最大化局部对比度,然后基于马尔科夫随机场模型^[9](MRF)框架对结果进行规整化,也实现了单幅图像的去雾,该方法能极大地增强图像的对对比度,但是容易导致图像的颜色失真,并且在场景深度不连续的地方会产生光圈效应。Fattal运用独立成分分析的方法,基于图像表面阴影(表面反射率光)和大气传递函数在图像局部块上统计不相关的假设,利用雾天图像退化模型,在MRF框架的约束下,实现了单幅图像的去雾。该方法虽然去雾效果显著,不过对于图像各个分量变化不大的情况,处理效果不好。针对暗原色先验理论在估计图像透射率时不够准确、容易引起Halo效应的问题,刘国^[10]等人采用自适应暗原色概念,即在暗原色的获取过程中引入自适应阈值,减小景深变化对暗原色获取的影响,进而正确求取透射率。此过程不需导向滤波的细化,也就避免了导向滤波引起的效率低和去雾不彻底的问题。

题,但是该方法在处理不同环境下的雾图的稳定性较差。Non-Local先验的算法对单幅图像去雾能够起到很好的效果,并且可以去除光照不均的影响,对于天空区域的处理效果较其他方法效果较好,但是该方法算法复杂度高,处理速度慢,不利于火箭在回收过程中快速锁定靶点目标。并且由于户外风的强度和太阳光照的角度都会影响成像采集,以往的去雾算法对环境条件多变的图像处理效果不佳。考虑到算法对不同场景的适应能力以及算法的稳定性,本文结合Retinex理论改进暗通道去雾算法,提升了其对不同环境的适应性,提高了图像质量。后续设计了实验分析对比了算法的可靠性。

其次,针对靶点特征提取时,以往国内外学者提出的诸如直方图分割^[11]、K均值(K-Means)和支持向量机(Support Vector Machine, SVM)结合的图像分割^[12]、二维最大类间方差法(Otsu)图像分割等算法^[13-14]对于目标点特征区域的分割效果不佳。并且提取到的靶点特征无法直接进行特征质心的求解。因此,本文根据实际环境改进二维最大类间方差法^[15-18],以数组存储方式遍历两次,适用于多目标区域标记与特性求解,并设计实验验证了该算法的可行性。

最后,针对双目视觉^[19]测量视差的获取需要立体匹配的的实现以及匹配算法处理的速率与准确率直接影响着舰体姿态的调整。采用单目视觉进行高度模型的构建。单目视觉测距^[20-21]是利用一个摄像装置获得图像来得到深度信息,一般分为两种方法,第一种是利用已知运动目标检测,该方法的关键在于快速准确地实现模板与投影图像之间的特征匹配或者实现多帧投影图像之间的对应特征元素匹配,如n点透视问题^[22-23](Perspective-n-Point, PnP)、即时定位与地图构建或并发建图与定位^[24](Simultaneous Localization and Mapping, SLAM)等。这种方法利用多个特征点之间的关系,可以估计目标的姿态^[25]。但相应的运算量将大大增加。第二种方法是结合相机的成像模型^[26],在了解参考物体的真实大小后便可测算高度。单目视觉结构简单,运算速度快,并且在本文中,地面靶标相关参数已知,因此在该先验条件已知的情况下选择单目视觉测距更加高效,并且通过实验定量分析了该方法的可靠性。

2 改进暗通道去雾的图像预处理

火箭喷射产生的“烟雾”特点与现实图片中的“雾”特点在成分、形成机制、外观特点和光学效应等方面存在一些共性,但也存在一些差异。这些差异主要来自不同的成因、物质组成和物理效应^[27]。具体成因如下:

(1)成分与形成机制方面:火箭喷射产生的“烟雾”主要是由燃料燃烧产生的尾焰所形成的燃烧产物和烟雾颗粒组成。这样的烟雾成分通常富含气态、固态或液态的颗粒物质,如氧化物、炭黑等。真实世界中的“雾”主要是由水蒸气在大气中凝结形成的微小水滴或冰晶组成。这种雾是由于空气中的水蒸气饱和度高、温度和压力变化而凝结的结果。

(2)外观方面:火箭喷射产生的“烟雾”通常呈现为灰黑色或者白色的尾焰,具有较浓的烟雾状。烟雾的形状和扩散特征在火箭喷射过程中会受到气流和湍流等因素的影响。真实世界中的“雾”具有较均匀的分布和较轻的浓度,呈现出模糊的效果,使得场景中的物体看起来模糊且失去细节。最后,在光学效应方面,火箭喷射的“烟雾”由于颗粒物质的存在,具有散射作用,可能会导致附近光线的扩散和反射,使场景中的物体看起来模糊或产生一定程度的光晕效果。

(3)光学效应方面:真实世界中的“雾”是由光线与雨滴或冰晶的散射和折射产生的,会导致光线的衰减,使得远处的景物看起来模糊,产生景深的感觉。

现有传统的算法在处理火箭回收场景的雾图时适应性较差,后续实验对比也证明了改进的暗通道去雾算法具有更强的适应性以及去雾效果。此外,火箭回收中雾的亮度常常受喷口喷出的火焰的影响,且单一的暗通道并不能因环境特性调节整体的亮度,因此导致去雾后图像中的特征点也变得模糊不清。考虑到Retinex理论可用于图像的亮度的调节,因此本节结合暗通道先验模型,主要利用Retinex理论改进暗通道去雾理论对透射率 $t(x)$ 进行处理,使得最终得到的图像能够最大限度地保留特征信息,以便后续对特征信息的提取与分析。

2.1 暗通道先验模型

在大气和水下环境等大尺度散射介质中,常见的室外图像退化模型是^[28]:

$$I(x) = J(x)t(x) + (1 - t(x))A(\infty), \quad (1)$$

其中: $t(x)$ 为直接投射率, $A(\infty)$ 为散射到成像路径中的无限远高度的大气辐射度。 $I(x)$ 和 $J(x)$ 分别代表有雾图像与无雾图像的强度, x 是图像中某一点处的一个像素。

暗通道先验表示在大多数非天空区域,大多数暗通道有非常低的平均亮度,亮度值在数值上逼近 0。传输率 $t(x)$ 可以表示为:

$$\begin{cases} \tilde{t}(x) = 1 - \min_{y \in \Omega(x)} \min_c \left(\frac{I^c(y)}{A^c} \right) \\ \min_{y \in \Omega(x)} \min_c \left(\frac{J^c(y)}{A^c} \right) \approx 0 \end{cases}, \quad (2)$$

其中: $\Omega(X)$ 为局部窗口, C 表示 R,G,B 三通道。为避免 $\tilde{t}(x)$ 过小导致整体图像偏白,这里设置阈值 T_0 ,最后得到暗通道先验去雾模型为:

$$J(x) = \frac{I(x) - A}{\max(\tilde{t}(x), T_0)} + A. \quad (3)$$

2.2 改进暗通道去雾的图像退化模型

上面介绍的暗通道先验的模型适用于较为普遍的环境,但在火箭回收时成像环境复杂,目标特征易受火箭喷口处火焰产生的雾和高亮度以及风向等因素的干扰,导致图像的细节丢失、对比度和饱和度降低、颜色出现偏差,直接影响对图像进行分类、定位、检测以及分割等。传输率 $\tilde{t}(x)$ 中包含图像细节部分,且直接关系到图像整体的亮度,考虑到基于图像增强的 Retinex 理论可对图像中细节部分增强,并且可以调节图像整体的亮暗。此外,Retinex 理论包括单尺度,SSR (Single-scale Retinex) 和多尺度 MSR (Multi-scale Retinex) 方法,SSR 算法是用于图像增强和去雾的一种基本方法,通过计算图像的对数域中的亮度值来实现。MSR 算法是基于多尺度的图像处理方法,旨在更好地处理图像的动态范围和对数域增强。尺度方法通常比多尺度方法简单易懂,容易实现和解释并且节省计算资源。在某些情况下,单尺度方法对于特定的图像特征和任务可能表现更加稳定。如图 1 所示,本文分别利用 SSR 和 MSR 处理图像,处理结果如图 3 所示,可以看到,在尺度分别为 200,300,400



图 1 街道雾图

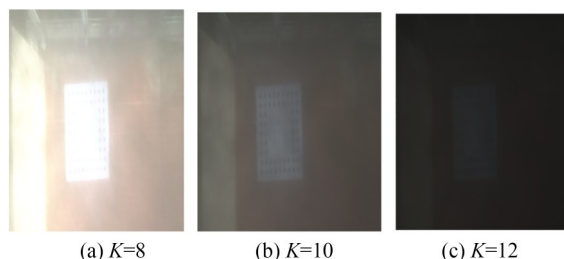
Fig. 1 Street fog map

时,MSR 算法处理后的图像偏暗,峰值信噪比 (Peak Signal-to-Noise Ratio, PSNR) 值和结构相似度均表现不佳。而且 SSR 的处理时间明显小于 MSR 的处理时间。综合考虑,首先考虑到透射率图是单通道的图像,因此不需要多尺度进行叠加运算。其次,为了使最终的图像去雾算法处理时间快、同等尺度下处理效果以及节省计算资源,本文利用 SSR 改进透射率函数,并将 $\tilde{t}(x)$ 重新定义为:

$$\tilde{t}'(x) = e^{K \cdot \left(\frac{\ln(\tilde{t}(x) + e)}{\max(\ln(\tilde{t}(x) + e))} \right)}, \quad (4)$$

其中: $\tilde{t}(x)$ 即为最终的透射率函数,其中 K 可根据雾的浓度和周围环境光的强度调节,根据大量实验和经验可知,当 K 的取值超过 10 时,图像暗度增高,不利于对特征进行提取和分析。分别取 $K=8, K=10, K=12$ 说明该问题,如图 2 所示,因此本文中 K 取值范围为 $(0, 10)$,该值对于其他算法不具有普遍意义。因此本文最终的图像去雾模型为:

$$\begin{cases} J(x) = \frac{I(x) - A}{\max(\tilde{t}'(x), T_0)} + A \\ \tilde{t}'(x) = e^{K \cdot \left(\frac{\ln(\tilde{t}(x) + e)}{\max(\ln(\tilde{t}(x) + e))} \right)} \end{cases}. \quad (5)$$



(a) $K=8$ (b) $K=10$ (c) $K=12$

图 2 不同 K 值对图像亮度的影响

Fig. 2 Effect of different K values on image brightness

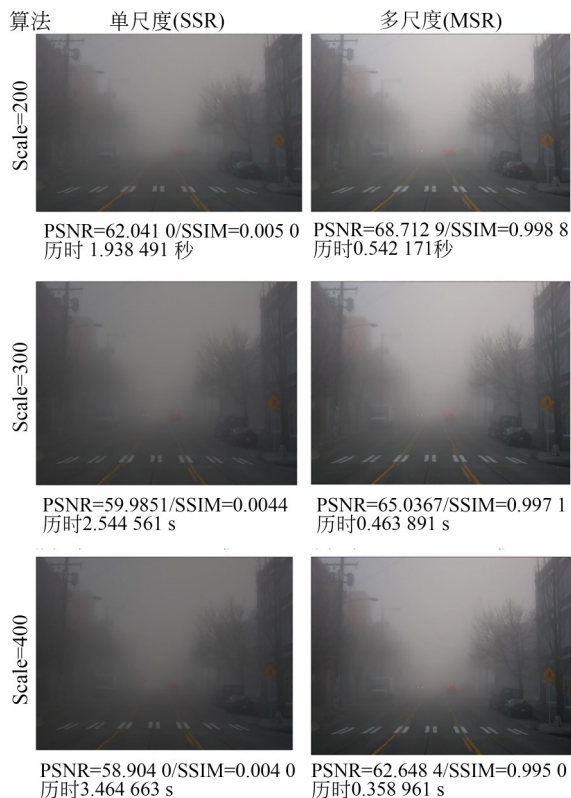


图3 单尺度(SSR)与多尺度(MSR)Reinex理论对比

Fig. 3 Comparison of single-scale (SSR) and multi-scale (MSR) Reinex theories

2.3 估计大气光值

本文基于暗通道先验估计大气光值^[29],其基本原理为对一幅图 D ,其暗通道为:

$$D^{\text{dark}}(x) = \min_{c \in (r, g, b)} [\min_{y \in \Omega(x)} (D^c(y))]. \quad (6)$$

利用公式(6)估计大气光值 A 的主要步骤如下:

(1) 利用(6)求解有雾图像的暗通道图像 D^{dark} 。

(2) 按照亮度的大小,选择暗通道 D^{dark} 内前0.1%像素,并记录这些像素点的坐标。

(3) 由(2)中得到的像素点的坐标分别在原图像的三个通道 (r, g, b) 内找到这些像素点并相加,得到 $(r_{\text{sum}}, g_{\text{sum}}, b_{\text{sum}})$ 。

(4) 最终可以得到三通道对应的大气光值为:

$$A^c = \left[\frac{r_{\text{sum}}}{N}, \frac{g_{\text{sum}}}{N}, \frac{b_{\text{sum}}}{N} \right], \quad (7)$$

其中, N 为前1%的像素点的个数。

为了说明本文大气光值估算方法的可靠性

以及改进后去雾算法的去雾效果,我们用如图3所示图像以及其对应的暗通道图像加以说明。仿真实验在Matlab R2021a上进行。按照大气光值估计方法的步骤,先求取暗通道图亮度为前1%的像素坐标。如图4所示,从暗通道灰度直方图可知,亮度为前1%的像素灰度范围为235~243,该灰度范围对应的暗通道图部分像素坐标如图5红色框标记所示(彩图见期刊电子版)。可见符合当前灰度值的暗通道图其中两个像素坐标为(25,226)以及(26,226),同样,其他符合灰度值范围的像素都能锁定。在得到暗通道图对应灰度范围的像素坐标之后,依次将暗通道各坐标值处的灰度值与R,G,B三通道图中对应坐标处的值求和,再按照式(7)即可求得大气光值的具体数值。通过计算,由图3(b)暗通道图估计得到的大气光值 $A^c = (237.27, 241.65, 236.25)$ 。最后将该值代入到去雾式(5),即可对图3(a)所示的图像做去雾处理,最终去雾的结果如图6所示。

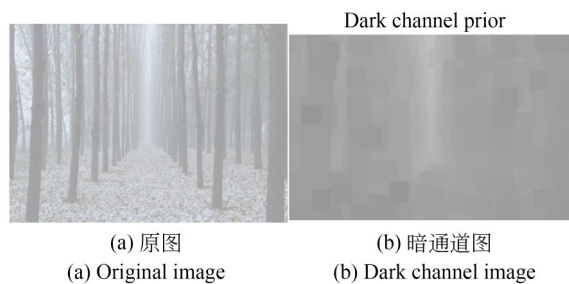


图4 原图及其对应的暗通道图像

Fig. 4 Original image and its corresponding dark channel i-image

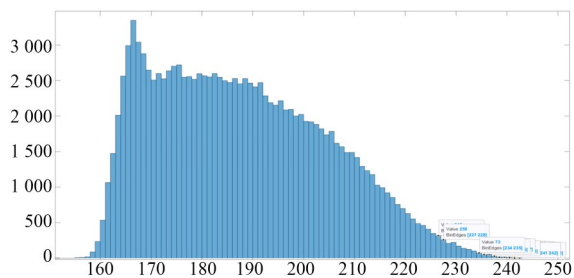


图5 暗通道图对应的灰度直方图

Fig. 5 Grayscale histogram corresponding to the dark channel -plot

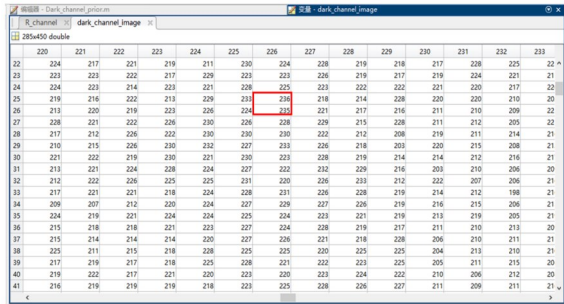


图 6 暗通道图亮度值前 1% 像素坐标
Fig. 6 Dark channel plot brightness values in the first 1%
pixe-l coordinates



图 7 去雾结果
Fig. 7 dehazing results

2.4 去雾效果对比

为了证明本文改进暗通道去雾算法的去雾效果,分别与何凯明,Fattle,Tan的去雾效果做对比,如图 7 所示为用不同算法对七幅常用去雾图像做去雾处理后的对比图。用峰值信噪比(PSNR)与结构相似度(Structural Similarity Index, SSIM^[30])来衡量去雾后图像质量。峰值信噪比(PSNR)用于表示信号的最大可能功率与影响其表示的保真度的破坏噪声的功率之间的比率。由于许多信号具有非常宽的动态范围,因此 PSNR 通常使用分贝标度表示为对数量。PSNR 在图像处理上主要用于量化受有损压缩影响的图像和视频的重建质量。本文中,峰值信噪比越大,表示去雾后图像质量越好。结构相似度(SSIM)用来量化图像去雾前后的相似程度,其值越接近 1,表明两幅图像越相似。峰值信噪比的计算公式如下:

$$\left\{\begin{aligned}MSE &= \frac{1}{3mn} \sum_{i=0}^{m-1} \sum_{j=0}^{n-1} [I(i,j) - K(i,j)]^2 \\ PSNR &= 20 \cdot \lg \left(\frac{MAX_I}{\sqrt{MSE}} \right)\end{aligned}\right. \quad (8)$$

这里 MSE 为均方误差, I, K 分别为去雾前后的图像, MAX_I 表示原图像点原色的最大值。如表 1 所示为不同去雾算法对图 1 中原图处理后的峰值信噪比。

表 1 不同算法处理下的峰值信噪比
Tab. 1 Peak signal-to-noise ratio under different algorithms

去雾算法 Image	HE	Fattle	Tan	Ours
1	64.490 9	61.390 4	60.949 3	64.153 7
2	65.730 4	58.954 2	64.206 8	65.707 4
3	57.111 5	57.961 5	65.130 2	57.484 5
4	67.190 2	62.131 0	61.141 3	67.408 1
5	61.648 2	63.336 5	65.230 5	62.838 9
6	59.624 1	54.005 6	62.922 1	59.980 7
7	56.944 4	55.056 0	64.031 5	57.304 2

从表中可以看出,相比于何凯明暗通道去雾算法,本文的算法处理后的图像峰值信噪比高,图像质量较好,且对比其他不同算法可知,我们的算法比较稳定,适用于更多的环境,这对后续应用于像火箭回收等复杂环境中特征点的提取非常重要。为了避免去雾过程导致图像失真,用结构相似度(SSIM)来定量评估去雾后图像的失真程度。如表 2 所示为七幅实验图像去雾前后的结构相似度(SSIM)。

表 2 七幅实验图像去雾前后的结构相似度
Tab. 2 Structural similarity of seven experimental images
befo-re and after defogging

去雾算法 Image	HE	Fattle	Tan	Ours
1	0.888 6	0.569 3	0.002 4	0.664 5
2	0.893 6	0.310 9	0.003 1	0.591 1
3	0.575 5	0.415 5	0.004 8	0.502 2
4	0.938 9	0.638 9	0.004 5	0.919 9
5	0.798 6	0.743 4	0.002 5	0.766 0
6	0.744 0	0.012 7	0.003 9	0.678 0
7	0.522 5	0.095 1	0.003 5	0.433 8

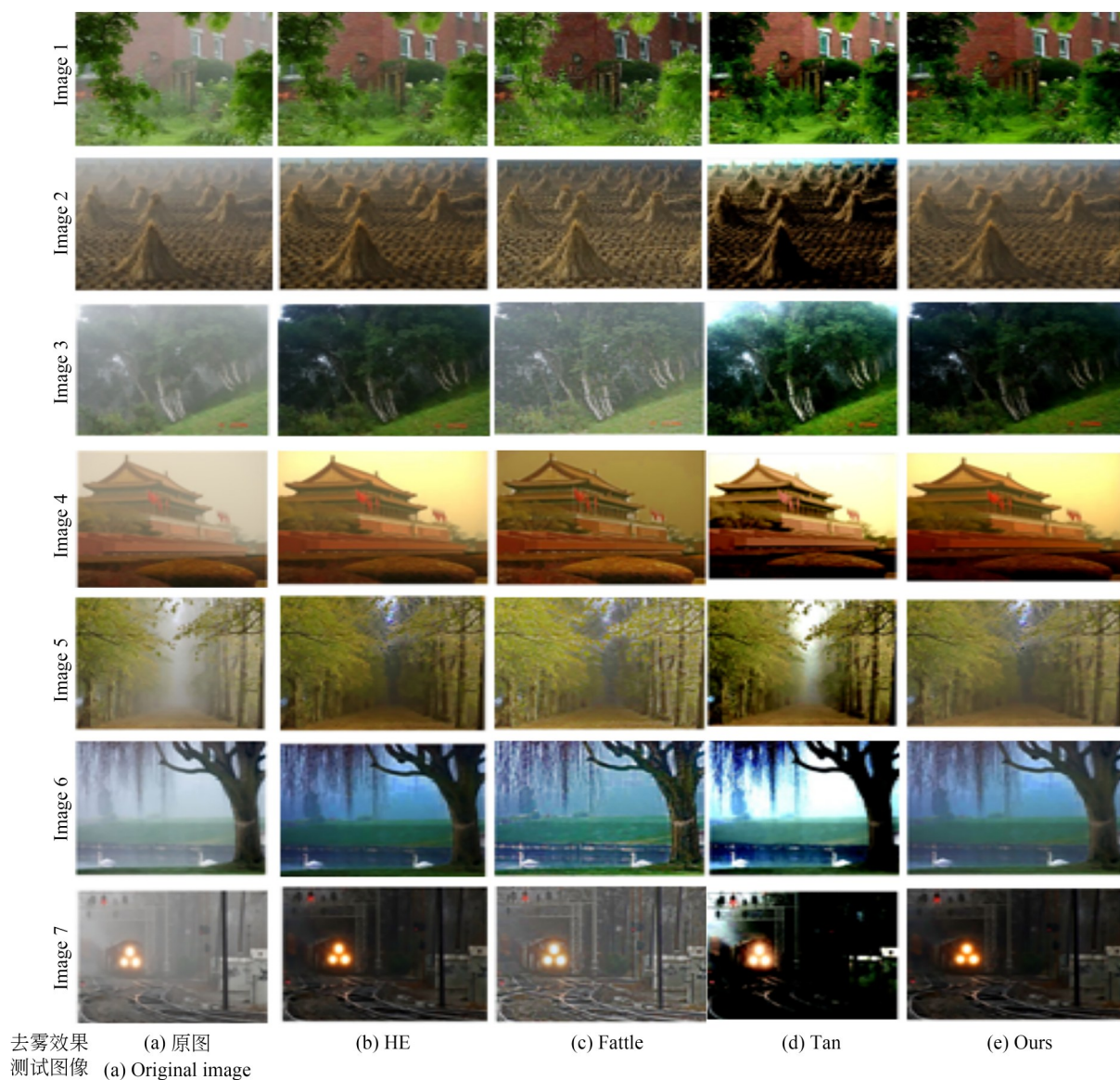


图 8 去雾效果对比

Fig. 8 Defogging effect comparison

从实验数据来看, Tan 的去雾算法处理过的图像相比于原图结构相似度较低, 这也可以从图 1 直观地看到, 处理过的图像大多像素缺失, 亮度降低。随着环境的变化, Fattle 算法并不能很好地适应一些特殊环境, 如图 1 中存在天空区域的图像出现了严重失真, 并且结构相似度值也较低。本文算法相比何凯明的算法结构相似度的数值存在较小的差异, 这些差异是由于为了突出图像整体的亮度, 将式(4)中的 K 值的取值范围设定在了 4~7 之间。这样可以提高图像所包含的信息量, 对后续提取特征信息非常重要。本文用平均梯度(Average Gradi-

ent, AG)和熵(Entropy, EN)来定量评估图像的清晰度与所包含信息量的多少。如图 8 和图 9 所示为七幅图像在不同算法处理后的平均梯度和熵值的对比。横坐标表示不同的图像, 纵坐标表示对应的熵值, 由于不同图像所包含的信息量是不同的, 因此图像中曲线出现了波动。对同一幅图像, 我们的算法在平均梯度和熵的数值上都较理想, 而其他算法在保留了亮度(平均梯度数值高)/信息量(熵值)时, 不可避免地会导致图像所包含的信息量/亮度降低。在测试了七幅图像后可以发现, 本文的去雾算法适用于不同的环境, 并且可极大程度地保留

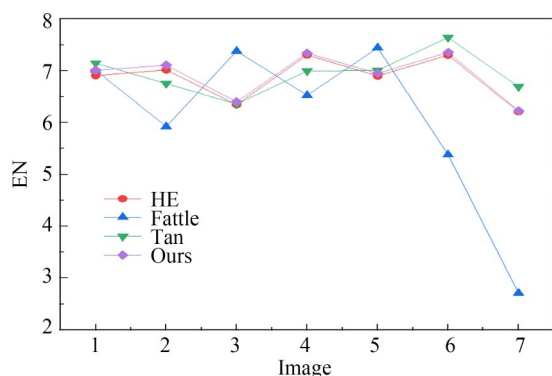


图 9 不同算法处理后七幅图像平均梯度

Fig. 9 Average gradient of the seven images processed by different algorithms

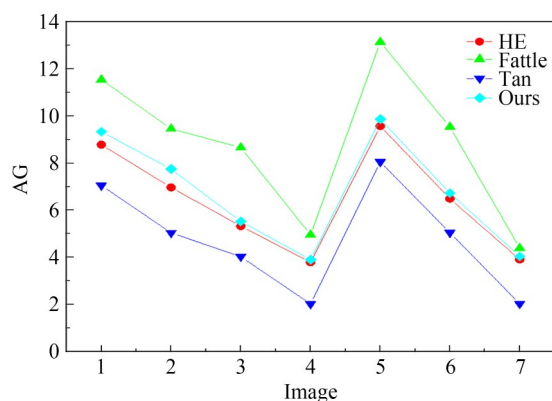


图 10 不同算法处理后七幅图像的熵

Fig. 10 Entropy of the last seven images is processed by different algorithms

图像的信息,这对后续提取靶点坐标与质心的求取非常重要。

3 基于二次遍历方法的质心提取

依据视觉图像信息测量火箭高度的前提条件是提取到地面落点的特征信息,进而求解特征的质心。质心求取的作用是识别出地面落点的位置信息,从而根据位置信息解算出火箭的位姿。快速而精确的质心提取将会提高测量的精度,缩短火箭位姿调整的时间。质心提取的前提是要有完整的特征形状,因此要对已知视觉图像信息做预处理,其中包括二值化、阈值处理、靶点标记等。常用的质心计算方法有质心法^[31]和高斯曲面拟合法^[32],但是高斯曲面拟合法计算复杂

度高,在以往的实际应用中很少采用,因此本文结合二遍历方法提取特征,利用质心法求取地面落点的特征质心。

3.1 针对靶点特征信息的图像预处理

3.1.1 二值化

本次火箭回收中高度测量技术研究实验中计划采用的靶标点为黑色,其余部分全部为白色,如图 10 所示。在二值化处理之前首先对图像做白平衡处理^[33-34],其目的是使得图像中的白色更突出,更容易凸显出靶点的边缘轮廓特征。以往的图像二值化方法大多是针对全局图像,处理效果如图 11(b)所示,可以发现图中靶点特征消失,对于靶标点的提取还要依靠图像分割与特征提取等操作,这大大降低了位姿解算的速率。因此本文仅依靠图像二值化与常规的图像处理理论,对靶点进行检测。考虑到阈值算法其实现简单、计算量小、实时性高,已经成为图像分割与图像二值化处理最基本和最广泛的技术之一,本文将对最大类间方差法进行改进,提升二值化效率且得到信息完整的靶点特征。其中 Sahoo 等人通过实验证明,最大类间方差 (Otsu) 是一种很好的阈值化方法,是经典的非参数、无监督自适应阈值选取方法^[35]。但一维像素灰度值仅仅反映了每个图像像素的自身灰度分布,没有反映出像素与领域的空间相关信息。基于这一点,刘建庄等人提出了二维 Otsu 算法,该算法充分利用了图像像素与其领域的空间相关信息。

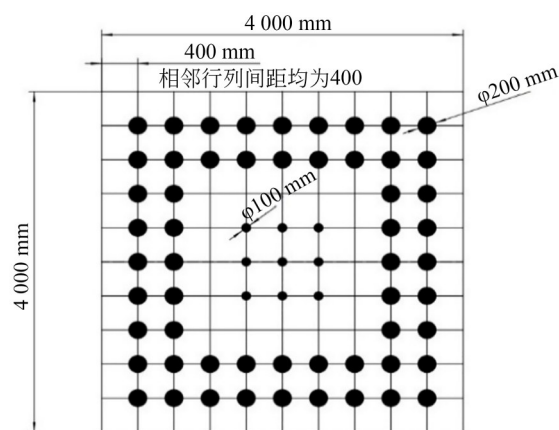


图 11 地面靶标图

Fig. 11 Ground target map

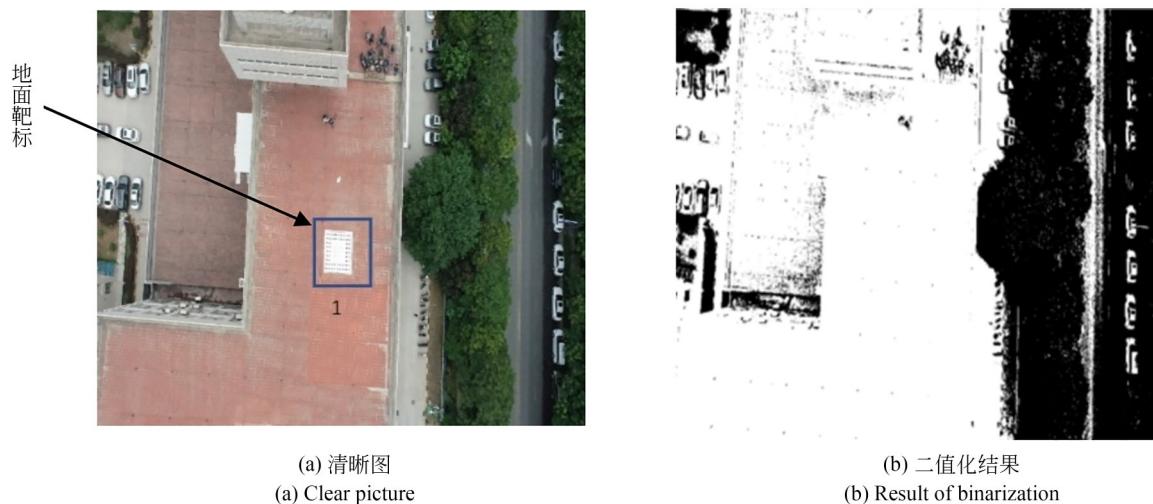


图 12 俯拍地面靶标

Fig. 12 Shoot the ground target from above

3.1.2 特征提取与分割

首先,对图像中每个像素计算其八邻域^[36]的平均灰度值 $\bar{g}$,该像素点本身的灰度 g 平均灰度 $\bar{g}$ 构成一个二元数组,设二元数组 $(g, \bar{g})$ 出现的频数为 $f_{g\bar{g}}$, N 为图像总的像素点数,灰度图像的灰度等级为 L ,则联合概率:

$$P_{g\bar{g}} = \frac{f_{g\bar{g}}}{N} (g, \bar{g} = 1, 2, 3, \dots, L), \quad (9)$$

$$\text{且有: } N = \sum_g \sum_{\bar{g}} f_{g\bar{g}}, \sum_g \sum_{\bar{g}} P_{g\bar{g}} = 1.$$

阈值 (s', t') 将二维直方图分为四个部分,如图 12 所示,区域 1 为图像前景,3 为背景,2 和 4 是需要去除的噪声等干扰因素。最终所要得到的是区域 1 中的靶标,也就是在前景图像的基础上进一步得到靶点。其他区域均当作背景处理,这有效地避免了背景区域噪声的干扰。

本文假设二维阈值函数如下:

$$(s', t') = (2s + \delta, 2t + \epsilon), \quad (10)$$

其中: δ, ϵ 分别为调控变量,可适当设置阈值搜索靶标。后续实验中验证 $\delta, \epsilon \in (-5, 5)$ 为最佳。

前景区域的概率为:

$$w_0 = \sum_g \sum_{\bar{g}} P_{g\bar{g}}. \quad (11)$$

背景区概率:

$$w_1 = 1 - w_0. \quad (12)$$

前景区、背景区对应的均值矢量以及总的均值矢量可以表示为:

$$\mu_0 = (\mu_{0i}, \mu_{0j})^T = \left(\sum_{i=0}^s \sum_{j=0}^t \frac{iP_{g\bar{g}}}{w_0}, \sum_{i=0}^s \sum_{j=0}^t \frac{jP_{g\bar{g}}}{w_0} \right)^T, \quad (13)$$

$$\mu_1 = (\mu_{1i}, \mu_{1j})^T = \left(\sum_{i=s+1}^{L-1} \sum_{j=t+1}^{L-1} \frac{iP_{g\bar{g}}}{w_1}, \sum_{i=s+1}^{L-1} \sum_{j=t+1}^{L-1} \frac{jP_{g\bar{g}}}{w_1} \right)^T, \quad (14)$$

$$\mu_T = (\mu_{Ti}, \mu_{Tj})^T = \left(\sum_{i=0}^{L-1} \sum_{j=0}^{L-1} iP_{g\bar{g}}, \sum_{i=0}^{L-1} \sum_{j=0}^{L-1} jP_{g\bar{g}} \right)^T. \quad (15)$$

类间方差:

$$\sigma^2 = w_0(\mu_0 - \mu_T)^T + w_1(\mu_1 - \mu_T)^2. \quad (16)$$

那么最优的阈值 (s, t) 满足下式:

$$\sigma^2(s, t) = \max \{ w_0(\mu_0 - \mu_T)^T + w_1(\mu_1 - \mu_T)^2 \}. \quad (17)$$

最后,结合公式(10)可得到最终靶点特征提取的最佳阈值 (s', t') ,相应的最终的特征图如图 13 所示,对比图二可以看到不需要其他的图像分割算法,只是在二维 Otsu 二值化的基础上添加了阈值函数 (s', t') 便可锁定靶点特征。

从图 15 可以看到,外围靶点信息由于无人机高度的影响显得较为模糊,并且图像中其余部分有多处噪声存在,这都不利于后续对质心的求取。从图中可以发现,内层靶点周围像素值均为 0,外层相邻靶点之间高度较近,这完全可以以形态学操作使其连接。

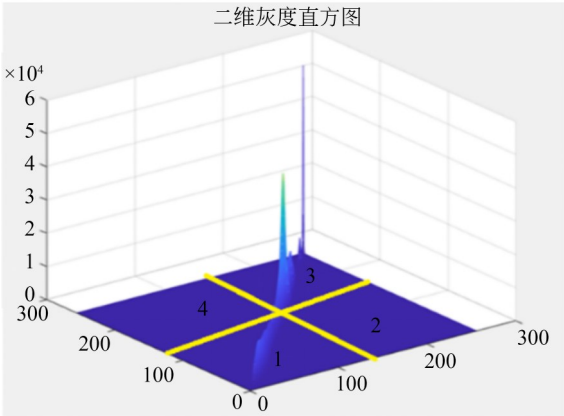


图 13 二维灰度直方图
Fig. 13 Two-dimensional gray level histogram

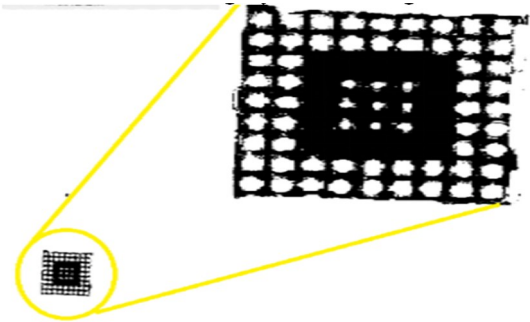


图 14 二值化靶点特征提取图
Fig. 14 Binarization target feature extraction diagram

我们采用先确定靶点区域,再利用区域边界分割特征的方法提取靶点特征。首先用如图 14 所示的结构元 B 对图 13 所示的结果做膨胀处理,可以得到如图 15 所示确定靶点区域的边缘信息。随后利用图 15 得到的边缘信息分割图 13 中的特征信息,保留边界以内的信息作为最后的靶点特征如图 16 所示。

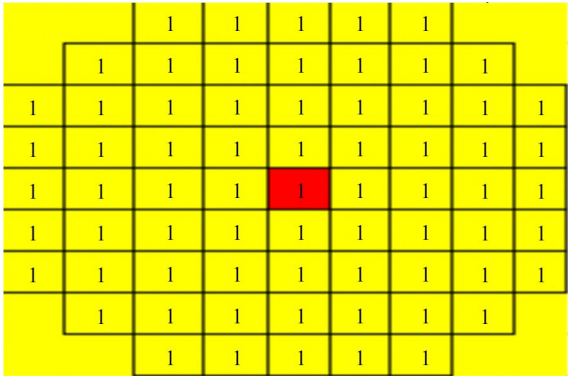


图 15 结构元 B
Fig. 15 Element of structure B

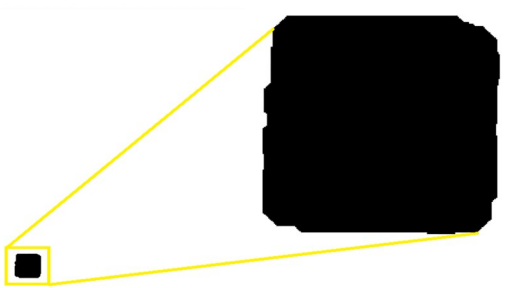


图 16 膨胀操作处理结果
Fig. 16 Expansion operation processing result

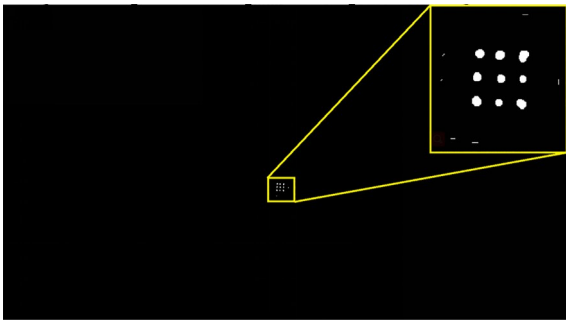


图 17 靶点初步提取结果
Fig. 17 Preliminary target extraction results

从图中可以看到靶点周围存在噪声,这对后续连通域判断有干扰,结合噪声特点,可以发现,此时出现的噪声都以单行单列出现,为了去除噪声,本文以如图 11 所示结构元 C 遍历整幅图像。记十字中心 (i,j) 为原点,以该原点遍历整幅图像,当原点的上下左右像素都为零时,将原点 (i,j) 处的像素值设为 0。

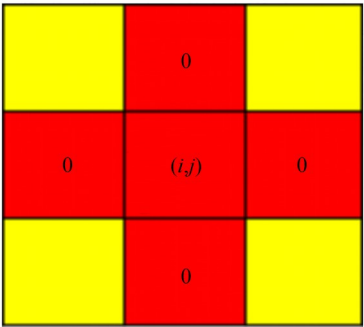


图 18 结构元 C
Fig. 18 Element of structure C

去噪后,我们得到如图 18 所示的靶点特征图,很显然,该特征图用来求解质心效果比图 13 好。

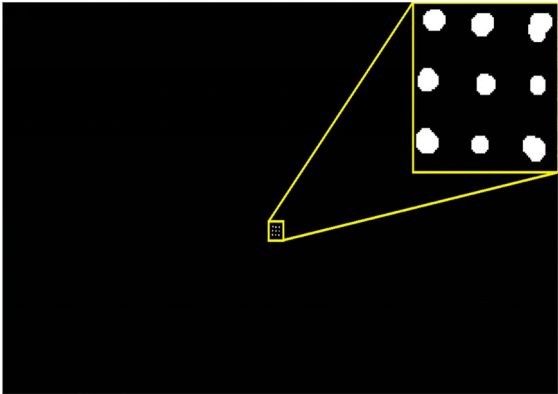


图 19 去噪后靶点特征图

Fig. 19 Target feature map after denoising

3.2 靶点标记与质心求解

火箭回收过程是火箭位姿不断调整的过程，高效和及时的地面位置信息的反馈对火箭的平稳降落至关重要。利用高斯拟合曲线法求解质心增加了算法的复杂度，不利于火箭姿态快速地调整。并且由于地面落点靶标的特性，对靶标进行顺序编码对求解不同特征点之间的位置信息

与有针对性的选择也是至关重要的，因此，本文结合二次遍历的方法利用质心法获取图像质心，第一次遍历基于如图 19 所示的结构元 D 遍历图像，令 $L=1$ ，当 $I(i,j)$ 处左、左上、上、右上像素值为 0 时，对 $I(i,j)$ 赋值为 1，当下一个满足该条件的像素点出现时，取 $L=L+1$ ，遍历步骤如图 20 所示。

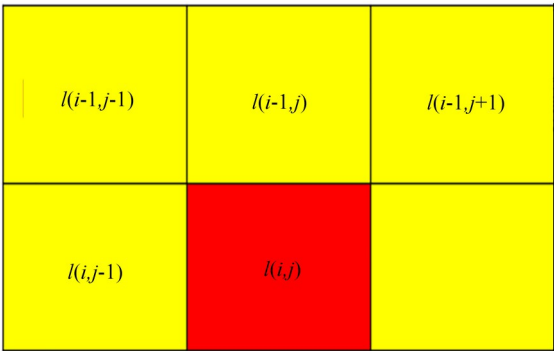


图 20 结构元 D

Fig. 20 Element of structure D

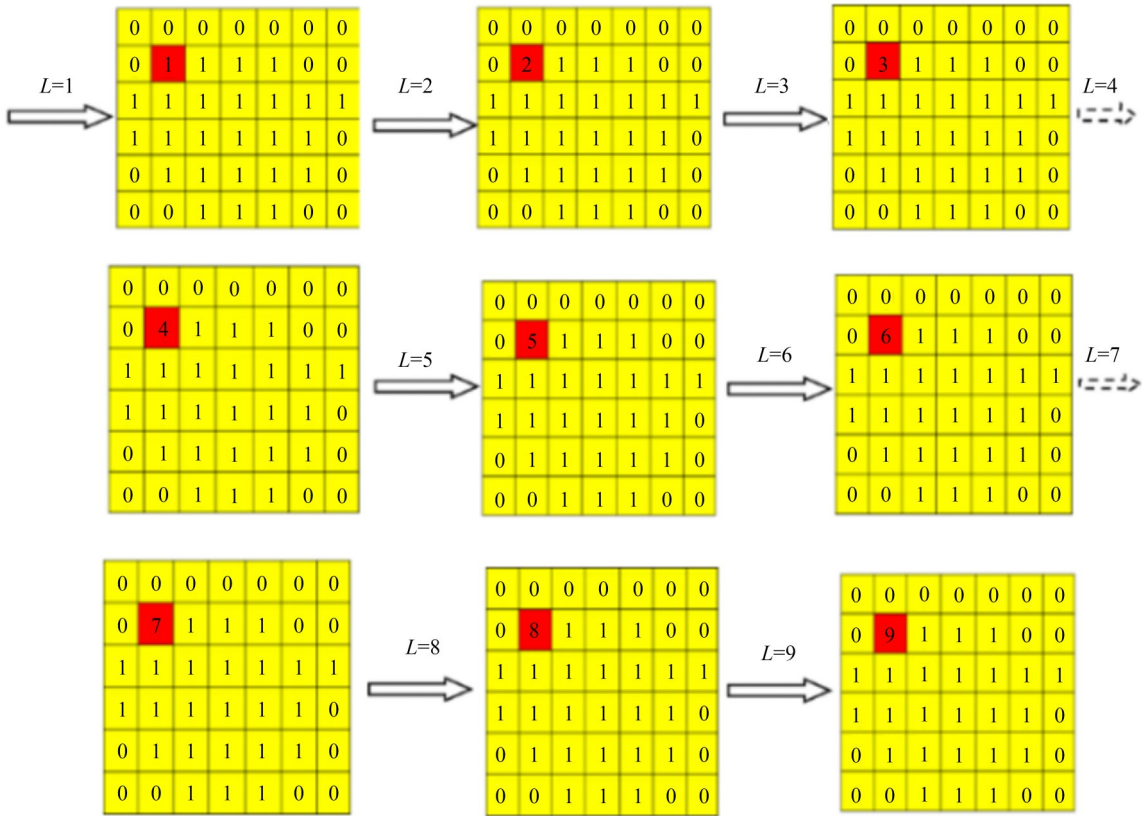


图 21 第一次遍历操作步骤

Fig. 21 Operation step is traversed for the first time

通过图 20 可以发现,靶点除了“首个”像素点值外,其他值均为 1。根据靶点像素值特点,进行第二次遍历。还是基于结构元 D,我们令 $I(i,j)$ 处的值为 $I'(i,j)$,那么可以得到:

$$I'(i,j) = \max [I(i,j-1)I(i-1,j-1) \\ I(i-1,j)I(i-1,j+1)]. \quad (18)$$

再对图像进行遍历操作后可得到如图 21 所示的效果。

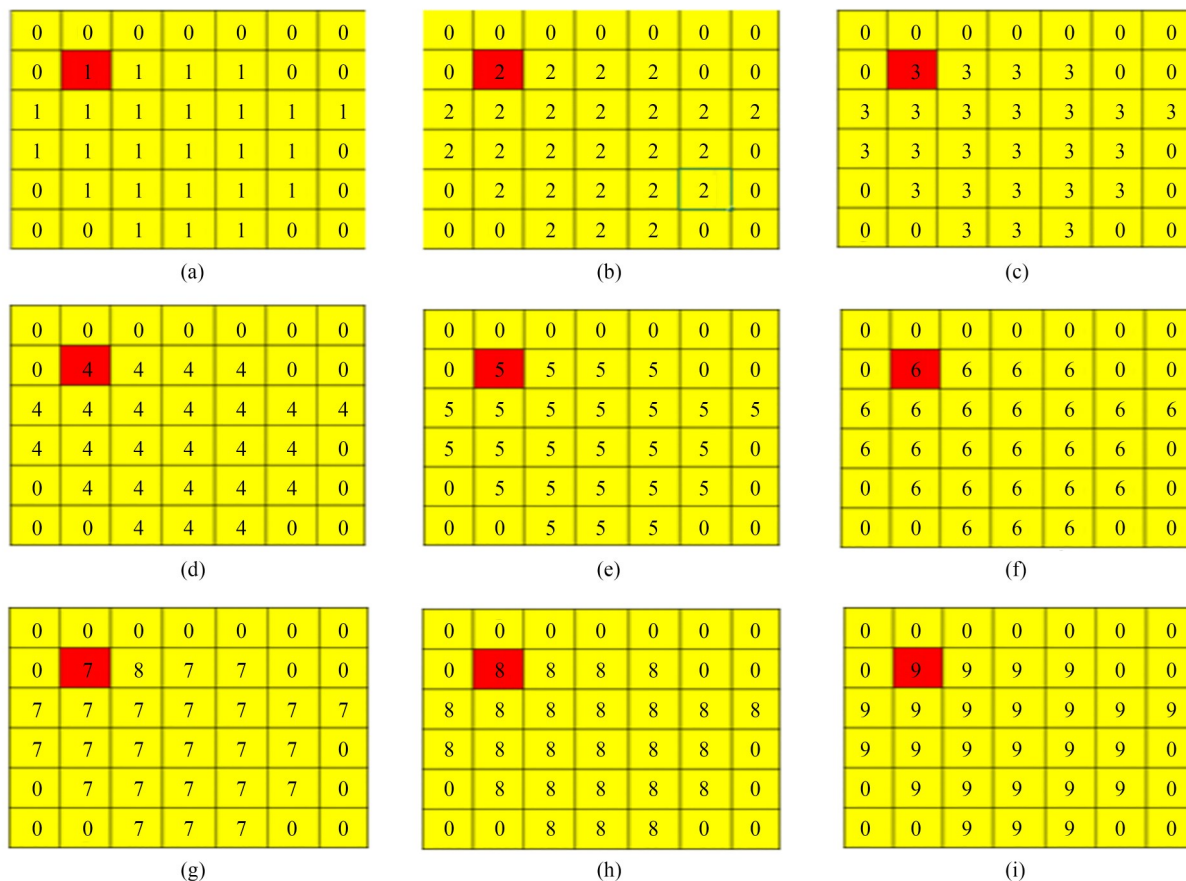


图 22 第二次遍历结果细节图

Fig. 22 Second iteration of the resulting detail map

最后,记第 K 个靶点的总像素数为 S_k ,用如下公式求质心坐标 (X_k, Y_k) 。结果如图 22 所示。在得到质心坐标后,可以求取任意两靶点像素坐标之间的距离。图中标记的九个特征点质心坐标如表 3 所示,通过计算,任意两靶点像素之间的距离也在距离矩阵表 4 中列出,单位是像素,距离矩阵是一个方阵,它记录了给定一组坐标点之间的距离。距离矩阵的行和列对应于输入坐标点的索引。由于图中共有 9 个点,因此距离矩阵的大小是 9×9 (9 行 9 列)。以其中元素 (2,3) 为例,其表示第 2 个点 to 第 3 个点的距离,也表示第 2 个点到第 2 个点的距离,其余点以此类推。对角线上的元素表示每个点到其自身的距离,一

般为 0。

$$\text{sum}x_k = \text{sum}_K(i), \quad (19)$$

$$\text{sum}y_k = \text{sum}_K(j), \quad (20)$$

$$\begin{cases} X_k = \frac{\text{sum}_k(i)}{S_k} \\ Y_k = \frac{\text{sum}_k(j)}{S_k} \end{cases} \quad (21)$$

3.3 实验分析

首先,为了验证本文靶点特征提取方法的可靠性,分别将其与 Canny 边缘检测算法, Sobel 算子, K-means 聚类算法做对比,从运算时间、处理效果定量评价算法。其次,为了说明质心解算方法的有效性,分别将其与阈值质心法、强权质心

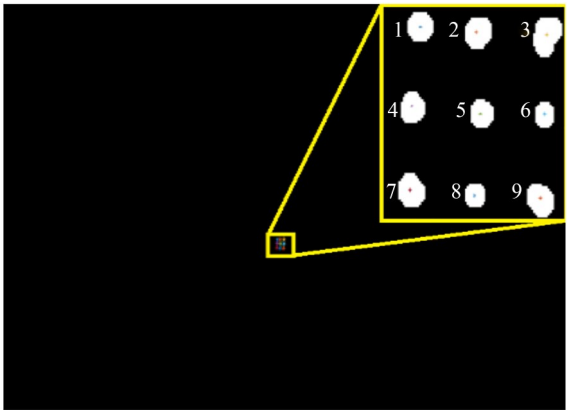


图 23 质心求取与标记结果图
Fig. 23 Centroid Finding and Labeling Result Plot

法以及普通质心法做对比,围绕质心坐标提取的准确性以及快速性进行评价。

如图 23 所示为对比结果,可以看到本文算法处理速度快,对特征区域的处理效果好,对于一

表 3 图 17 所示靶点质心坐标		
Tab. 3 Figure 17 show the target centroid coordinates		
靶点	X	Y
1	2 652	1 810
2	2 653	1 778
3	2 657	1 748
4	2 684	1 750
5	2 683	1 812
6	2 686	1 781
7	2 715	1 813
8	2 718	1 751
9	2 717	1 781

些干扰噪声,本文算法在处理过程中可忽略不计。

表 4 图 17 所示任意两靶点之间的距离									
Tab. 4 Figure 17 show the distance between any two targets									
靶点	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	0	32.016	62.201	68.000	31.064	44.688	63.071	88.527	71.176
2	32.016	0	30.265	41.773	45.343	33.136	71.197	70.385	64.070
3	62.201	30.265	0	27.074	69.080	43.932	87.115	61.074	68.476
4	68.000	41.773	27.074	0	62.008	31.064	70.214	34.015	45.277
5	31.064	45.343	69.080	62.008	0	31.145	32.016	70.328	46.011
6	44.688	33.136	43.932	31.064	31.145	0	43.186	43.863	31.000
7	63.071	71.197	87.115	70.214	32.016	43.186	0	62.073	32.062
8	88.527	70.385	61.074	34.015	70.328	43.863	62.073	0	30.017
9	71.176	64.070	68.476	45.277	46.011	31.000	32.062	30.017	0

值得注意的是,以上图像处理以及最终的质心求取过程,均是在 Matlab R2012a 软件中进行,利用 MATLAB 进行图像处理、目标区域标记(如连通区域标记)并求解特性时,通常会使用矩阵(数组)来存储图像或数据。在进行区域标记时,通常会生成一个矩阵,其中的每个元素表示一个像素的属性或标记,以便区分不同的目标或区域。这种方式能够便于对图像进行处理和分析。其中,二值图像和分割后的二值图像,用逻辑数组(如 0 表示背景、1 表示目标)来表示。这种方式

简洁明了,适用于简单的目标识别和属性求解。目标区域标记使用整数数组来标记不同的目标或区块。每个目标会被赋予一个不同的整数值,在求解特性时可以根据这些整数值来区分不同的目标。使用结构数组来存储每个目标或区域的特性信息,比如质心坐标、面积、周长等。这种方式能够更加灵活地存储和管理目标的特性信息。采用数组的存储方式进行多目标区域标记和特性求解具有高效性、易用性和灵活性等优点,能够帮助我们高效地进行图像处理和分析。

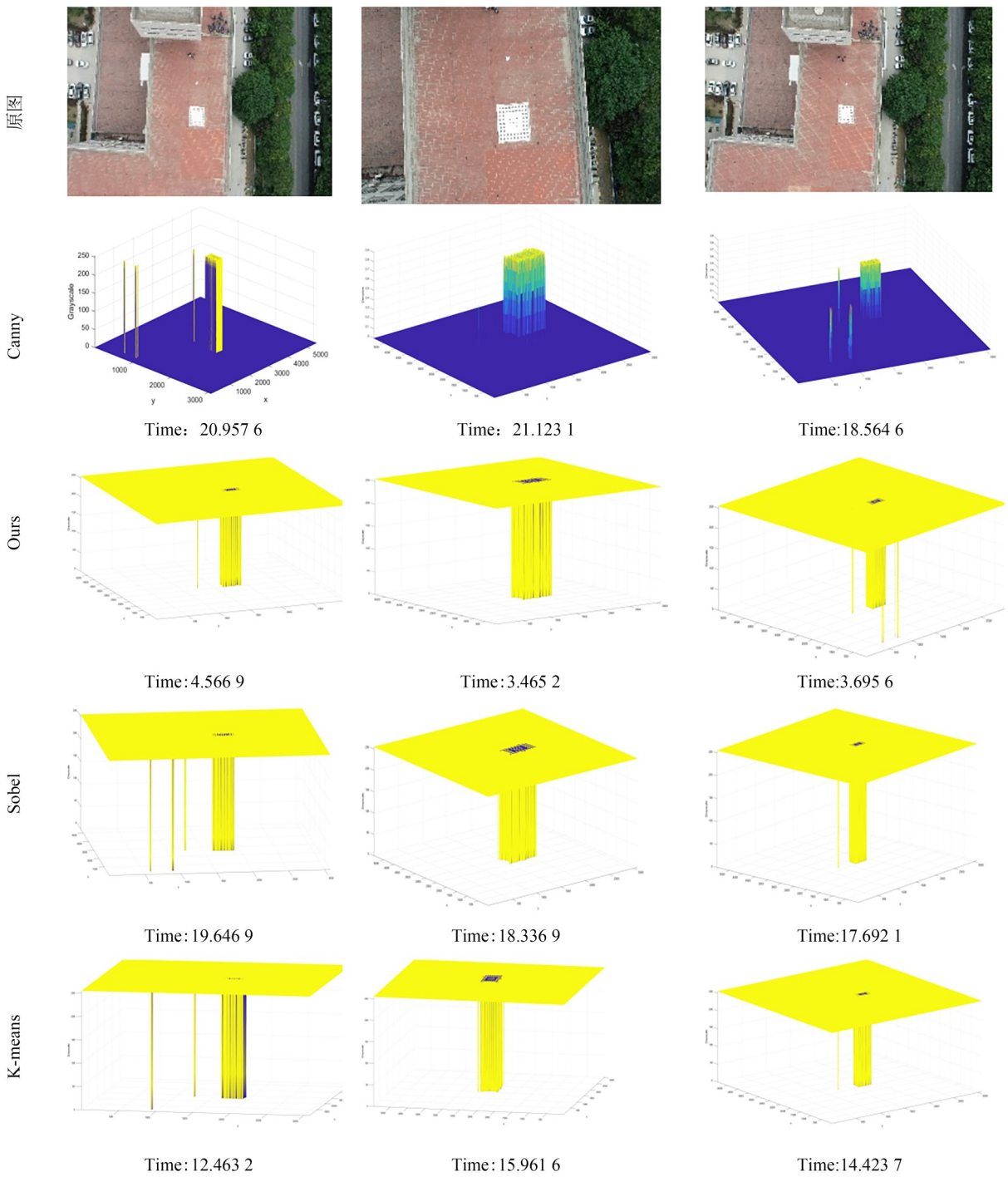


图 24 图像特征分割效果的对比实验

Fig. 24 Comparison of image feature segmentation effect

图 23 图像特征分割效果对比图为了验证质心提取算法的准确性以及快速性,本文利用如图 24 所示的图像做测试以及对本文算法与其他三个算法做对比实验,质心标定结构如图 25 所示,相应的质心坐标如表 5 所示,从算法的运算时间来看,本文质心提取算法明显优于其余三种算

法,质心提取的准确性上,阈值质心法、加权质心法以及本文算法提取的结果一致,较普通质心法要准确。并且可以清晰地看到,本文图像分割后极大程度地保留了质心特征,而其他特征提取算法处理后的图像特征存在边缘丢失的情况,因此,综合来看,无论从处理速度以及算法可靠性

表 5 不同质心提取算法求得的质心坐标

Tab. 5 Centroid coordinates obtained by different centroid extraction algorithms

算法	普通质心法		阈值质心法		加权质心法		本文算法	
坐标	X	Y	X	Y	X	Y	X	Y
靶点 1	133.000	213.286	133.000	213.500	133.000	213.285	133.000	213.500
靶点 2	117.444	214.333	117.500	214.500	117.444	214.333	117.500	214.500
靶点 3	124.857	213.571	125.000	213.714	124.857	213.571	125.000	213.714
靶点 4	118.000	221.285	118.000	221.500	118.000	221.285	118.000	221.500
靶点 5	133.428	220.857	133.420	221.000	133.428	220.857	133.420	221.000
靶点 6	125.571	221.857	125.714	222.000	125.571	221.857	125.714	222.000
靶点 7	133.750	229.000	133.875	229.125	133.750	229.000	133.875	229.125
靶点 8	118.200	229.700	118.300	229.800	118.200	229.700	118.300	229.800
靶点 9	125.857	229.428	126.001	229.500	125.857	229.428	126.001	229.500

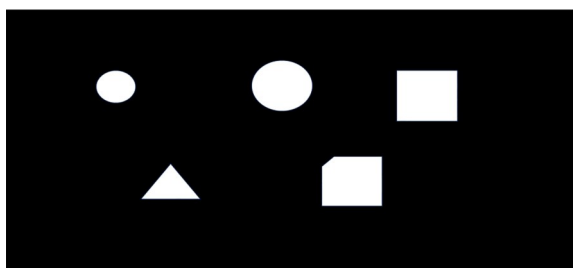


图 25 图质心提取精度检测模板

Fig. 25 Centroid extraction accuracy detection template

上,本文算法均可满足对质心提取的准确性以及快速性。

4 基于单目视觉的垂直高度测量模型设计

视觉测量技术研究重点是物体的几何尺寸及物体在空间的位置、姿态等的测量^[37]。利用视觉传感器测量运动目标的位姿是被广泛应用的有效方法,在测量过程中不需要引入其他的测量装置,也不会影响被测目标的运动参数。因此,对于大尺寸运动目标轨迹位姿测量,视觉测量方法是有效且合适的^[38]。同时视觉测量是基于光学图像理论,因而测量系统具有很高的可靠性^[39]。单目视觉位姿测量^[40]是指用目标上的特征点来估计三维物体的位置和姿态,其结构简单。本文基于单目视觉测距原理,在已知地面靶点特征参数与相关先验条件的基础上测量火箭与地面落点之间的高度。在求解无人机与地面靶点的高度前,必须明确航向高度、地面分辨率与焦

距的关系,尤其是地面分辨率会随着拍摄角度的变化而变化。这对准确求取航向高度有着非常大的影响。但是,无论是垂直拍摄还是斜视,像元大小是不变的,且每一次的任务对地面分辨率都有相应的要求,传统摄影测量(垂直拍摄)条件下,每一行列的分辨率都是定值,三者之间是简单的相似三角形关系^[41],如图 26 所示。

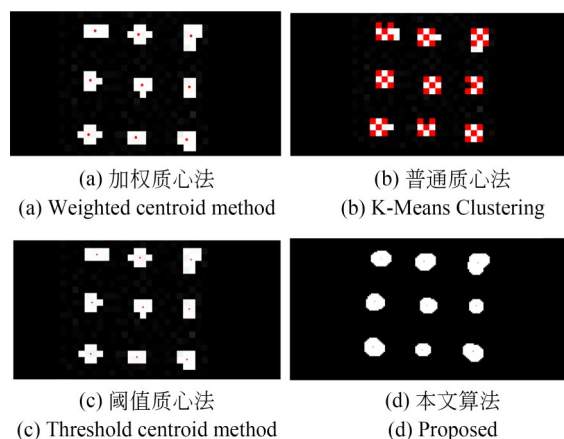


图 26 不同算法对模板图质心提取后的结果

Fig. 26 Results of centroid extraction of template graph by different algorithms

由图可知:

$$\frac{a'}{a} = \frac{f}{H}. \quad (22)$$

可推导出:

$$H = \frac{fa}{a'}, \quad (23)$$

式中: H 表示相对航高; f 表示镜头焦距; a' 表示像

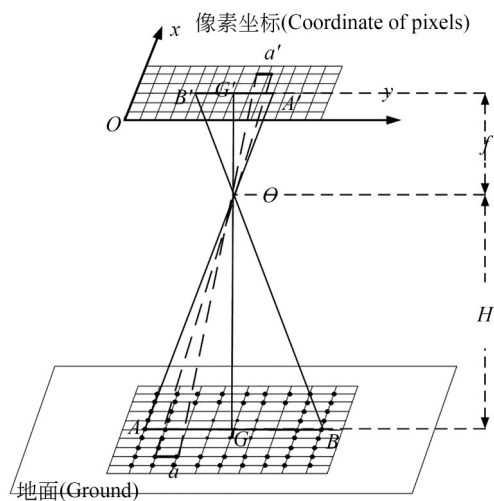


图 27 传统摄影条件下参数之间的几何关系

Fig. 27 Geometric relationship between parameters under traditional photographic conditions

元的大小; a 为地面分辨率。由前面质心坐标,可以任意选取两点求取像素坐标之间的高度,在火箭搭载的摄像镜头已知的情况下可以利用式(23)求得火箭高度地面的高度 H 。后续实验会证明这一理论模型的正确性。

5 实验结果分析

5.1 实验设置

本文采用大疆精灵 Phantom4ProV2.0 无人机模拟火箭下降的运动状态,利用图 4 所示靶标充当地面落点。相邻靶点之间的 400 mm。其中雾图的获取成了难点,因为很难模拟出火箭在降落过程中喷口处的雾。雾的产生是由于反射回摄像装置的光线在雾的影响下产生了发散与消逝,使得光线呈不规则状进入摄像装置,进而使得物体形状模糊和变形。为了模拟烟雾的环境,本文中用投射率不同的薄膜粘贴在摄像头上,使得成像模糊,如图 29,用到的部分薄膜如图 28 所示。雾的浓度用图像平均梯度 AG 和图像的熵 EN 定量表示。AN 的值代表图像的梯度,值越大,说明图像越清晰,雾浓度越浅。EN 表示图像的熵,单位是比特/像素(bit/pixel, bpp)。EN 值越大,说明图像包含的信息越多。无人机的焦距 $F=8.319\text{ mm}$,云台像元大小:0.002 4 mm。

最后分别从不同高度拍摄五组图像,如图 30



图 28 大疆精灵 Phantom4ProV2.0 无人机

Fig. 28 DJI Phantom4ProV2.0 drone



图 29 不同透射率薄膜

Fig. 29 Thin films with different transmittance



图 30 不同薄膜遮挡摄像机镜头

Fig. 30 Different films block the camera lens

所示为实验现场图。五组图像中,第一组为清晰图,其余四组图像分别是对无人机云台粘贴薄膜后在与第一组图像同一高度处拍摄。随后利用这五组图像进行去雾算法和高度解算算法定量分析,本文中雾的强弱用熵 EN 与平均梯度 AG 衡量。

5.2 去雾实验结果分析

分别用不同去雾算法对图 31(a)中 OJI_1~OJI_8 图做去雾处理,结果如图 31(a)~31(d)所示。雾的浓度用熵 EN 的值定量表示,如表 6~7 所示分别为不同处理算法得到的峰值信噪比 (PSNR)与结构相似度 (SSIM)数据。

通过定量分析可以看到,针对这一特殊环境,相比于何凯明的去雾算法,我们的去雾算法得到的图像峰值信噪比大,表明图像质量较好。Fattle 和 Tan 的去雾算法虽然得到的峰值信噪比值也比较高,但是,通过定量分析其平均梯度 (AG)与熵 (EN)可知,他们的算法处理后的图像亮度和信息的完整性上效果并不好,如图 32~图

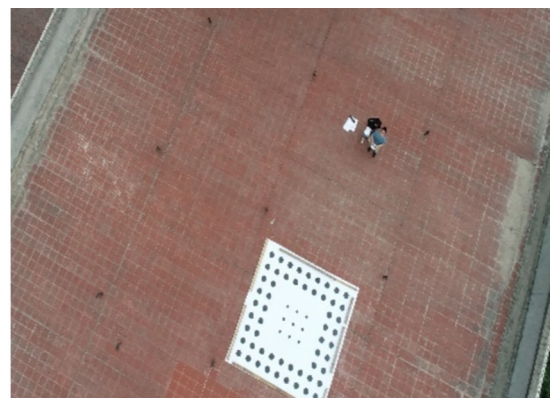


图 31 实验现场

Fig. 31 Site of experiment

33 所示分别为针对同一雾浓度 (用原图的熵

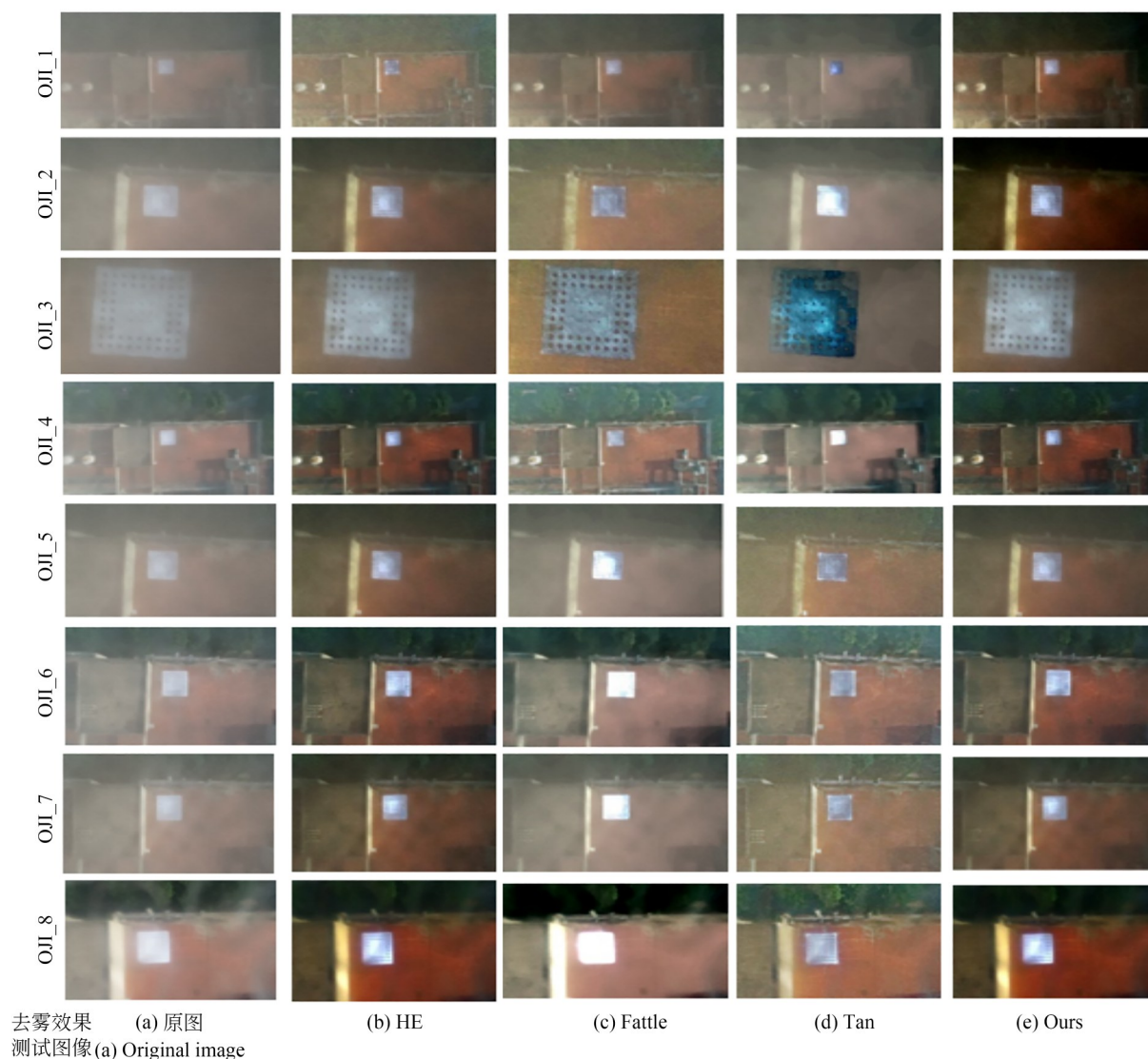


图 32 不同浓度雾图去雾效果

Fig. 32 Fogging effect of fog map with different concentration

表 6 不同算法对同一雾浓度图处理后的峰值信噪比
Tab. 6 Peak signal-to-noise ratio of the same fog concentration graph processed by different algorithms

去雾算法 EN	HE	Fattle	Tan	Ours
6.191 2	67.076 6	69.066 9	64.214 6	68.001 6
6.225 2	62.862 4	71.876 4	72.190 7	63.151 3
6.256 5	68.670 1	62.872 4	69.442 5	69.415 4
6.270 2	63.015 0	69.066 9	71.696 2	64.696 4
6.274	61.487 2	68.602 8	72.686 8	61.779 0
6.518 9	61.895 1	63.537 6	71.235 3	61.518 9
6.668 2	60.310 3	65.370 1	71.607 3	60.571 9
7.029 2	60.077 9	64.831 5	67.920 4	60.326 6

表 7 不同算法对同一雾浓度图处理后的结构相似度
Tab. 7 Structural similarity of the same fog concentration graph-h processed by different algorithms

去雾算法 EN	HE	Fattle	Tan	Ours
6.191 2	0.944 5	0.953 2	0.007 9	0.673 1
6.225 2	0.887 4	0.970 7	0.465 1	0.864 6
6.256 5	0.947 6	0.787 8	0.007 2	0.867 7
6.270 2	0.888 8	0.965 3	0.007 1	0.430 2
6.274	0.848 6	0.868 8	0.007 1	0.816 9
6.518 9	0.843 6	0.719 7	0.006 9	0.809 0
6.668 2	0.779 7	0.873 1	0.007 1	0.727 0
7.029 2	0.744 9	0.752 1	0.006 8	0.674 5

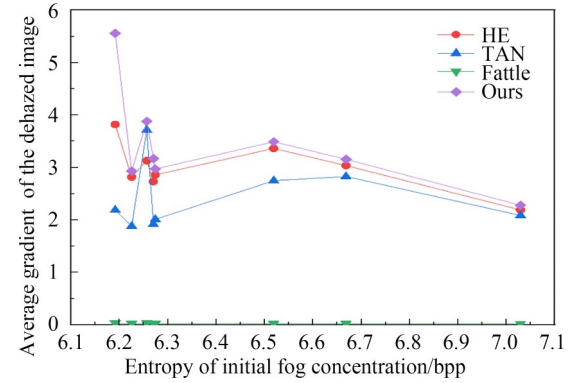


图 33 去雾后图像的熵
Fig. 33 Entropy of the image after de-fogging

(EN)表示)不同算法处理后的平均梯度(AG)与熵(EN)。可以看到,虽然Fattle算法处理后图像的熵值一直处于最大,但是其平均梯度(AG)值较低。这会影响图像的清晰度,进而对提取靶点坐标构成干扰。从定量分析的数据来看,本文的算法针对特定和复杂的环境具有很好地适应能力。

5.3 高度解算实验结果分析

通过采用不同去雾方法对上面实验雾图定量分析可以发现,本文的去雾方法对不同高度处不同雾的处理效果一直较好。之后,再针对上述所示的雾图做高度解算实验。其中表 8 是无人机镜头在无遮挡且光照条件较好的条件下,分别从不同高度测量所得到的数据,以用来检验高度解算算法的可行性。其中实际高度为无人机自带的高度测量元件所测得的数据。从最终实验的解算结果可以看到,本文高度解算算法效果较好。之后针对火箭回收过程中火焰产生的雾,用本文中的去雾、质心提取、高度解算方法对不同高度处所得到的一组雾图做高度解算,如图 34 所示为不同高度处的清晰图,实验中给相机加薄膜,使得最高处时雾图的熵(EN)为 6.225 2 平均梯度(AG)为 1.740 8。最后对所得的雾图用不同去雾算法去雾后解算高度。当去雾后的图像峰值信噪比(PSNR)的值处于 60~70 之间且结构相似度(SSIM)接近 1 时可以得到图 35 所示为高度解算结果。其中,两质心之间的距离如表 8 第四列所示,质心像素误差为 0.106 8 个像素。从表 8 中的实际误差可以看到,其绝对误差在

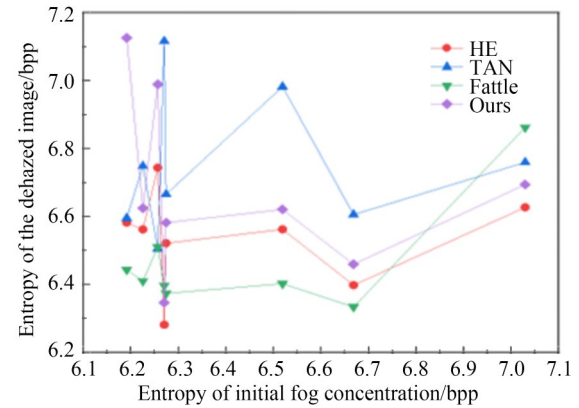


图 34 去雾后图像的平均梯度
Fig. 34 Average gradient of the image after de-fogging

0.5 m 左右,相对误差百分比为 1% 居多。但是由于在人为控制无人机降落过程中,或多或少的无人机的落点会发生改变,因此无人机拍摄到的图像大部分为白色背景区域,而本文去雾算法对白色背景居多的情况下处理效果不佳,因此导致对图像中特征信息的提取出现误

差,进而质心解算结果不准确,最终导致高度测量的结果误差较大。因此,本文去雾算法能更好地用于火箭回收中雾图的高度解算,并且基于单目视觉的垂直高度测量模型也适用于火箭回收过程中对火箭距离地面靶标的高度进行测量。

表 8 无遮挡且光照条件较好的条件下分别从不同高度测量所得高度数据
Tab. 8 Measure data from different heights under unobstructed and well-lit conditions

图片 序号	实际高 度/m	解算结 果/m	靶点质心 距离/mm	绝对误 差/m	相对误差 百分比	图片序 号	实际高 度/m	解算结 果/m	靶点质心 距离/mm	绝对误 差/m	相对误差 百分比
1	47	47.00	13.559 3	0.00	0	15	27	27.32	7.789 4	0.32	1%
2	46	46.22	13.270 8	0.22	1%	16	25	24.07	7.212 4	0.93	4%
3	45	44.87	12.982 3	0.13	0	17	23	23.55	6.635 4	0.55	2%
4	44	44.30	12.693 8	0.30	1%	18	20	20.21	5.769 9	0.21	1%
5	43	43.74	12.405 3	0.74	2%	19	18	17.62	5.192 9	0.38	2%
6	42	41.90	12.116 8	0.10	0	20	15	17.61	4.327 4	-2.61	1.7%
7	40	41.57	11.539 8	1.57	4%	21	13	12.80	3.750 5	0.20	2%
8	39	38.57	11.251 4	0.43	1%	22	12	11.72	3.462 0	0.28	2%
9	38	38.03	10.962 9	0.04	0	23	11	10.67	3.173 5	0.34	3%
10	36	36.63	10.385 9	0.63	2%	24	9.1	9.01	2.625 3	0.09	1%
11	34	34.66	9.808 9	0.66	2%	25	8.2	7.86	2.365 7	0.34	4%
12	33	33.41	9.520 4	0.41	1%	26	6.8	6.42	1.961 8	0.38	6%
13	31	31.26	8.943 4	0.26	1%	27	5.3	5.12	1.529 0	0.18	3%
14	29	28.83	8.366 4	0.18	1%	28	3.2	3.06	0.923 2	0.14	4%

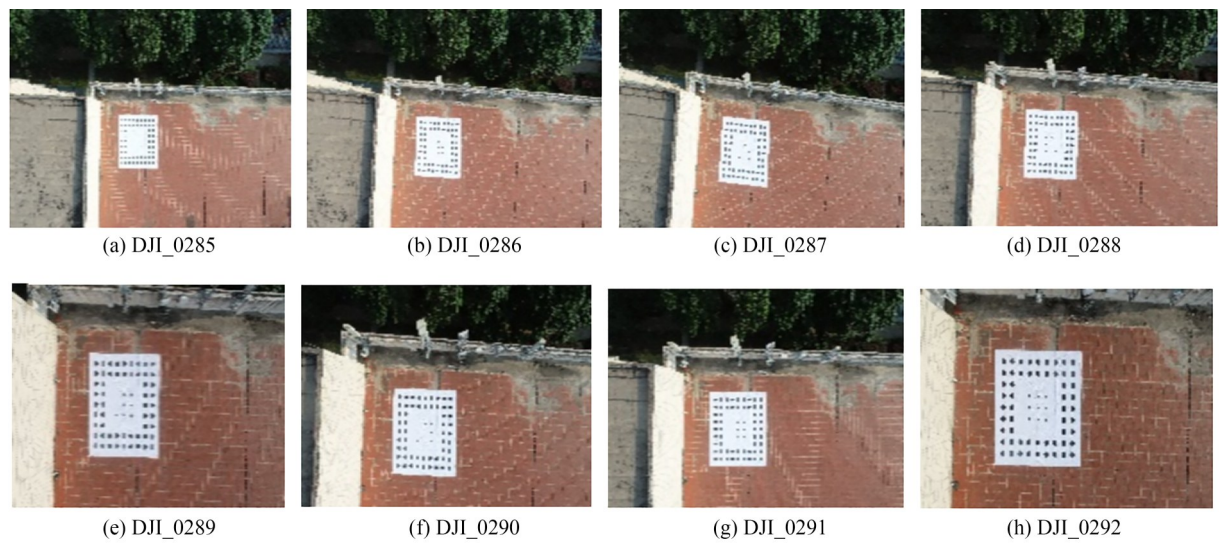


图 35 清晰图

Fig. 35 Clear picture

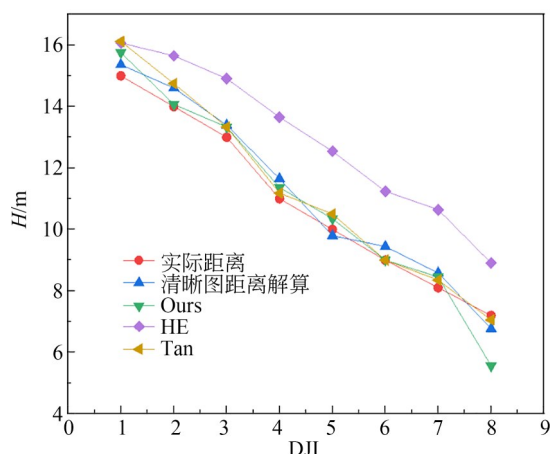


图 36 不同去雾算法去雾后高度解算结果对比

Fig. 36 Comparison of the height solution results of different de-fogging algorithms

6 结 论

本文针对火箭回收降落过程中雾对成像质量、高度解算等的影响,在何凯明去雾算法的基础上,结合 Retinex 理论对暗通道去雾算法做了改进,提升了其对不同环境的适应性,提高了图像

质量,从定量分析的数据可以看到效果较好。并且为了能够更好地对靶点特征提取,提出了适用于靶点特征提取的算法,基本原理是对二维 Otsu 算法加以改进,使得在二值化的过程中能够快速准确地提取到靶点信息,无需再对采用图像分割获得特征,并设计实验验证了该算法的可行性。构建了高度解算的数学模型,并设计实验定量分析了算法的可靠性。最后结合火箭回收中实际的场景搭建实验场景并拍摄图片做高度解算数据分析。定量分析了不同雾浓度对去雾算法以及高度解算的影响,并定量分析了不同去雾算法对高度值的求取效果。当峰值信噪比(PSNR)的值处于 60~70 之间且结构相似度(SSIM)接近 1 时,可最大限度地保留特征信息,并且当两质心之间的误差在 0.106 8 个左右像素时,本文构建的数学模型能够将高度精度控制在 0.5 m 之内,而去雾后高度的精度也能控制在 0.5 m 左右,该精度为火箭在 0~47 m 之内得到的结果,基本满足火箭回收中火箭高度测量的需求。不论是去雾算法、质心提取算法以及高度解算算法,本文算法都能很好地适用于火箭回收的场景。

参考文献:

- [1] 陈志会, 宁雷, 王鹏. 运载火箭助推器回收技术分析[J]. 宇航总体技术, 2021, 5(5): 66-74.
CHEN Z H, NING L, WANG P. The development of launch vehicle booster recovery technology [J]. *Astronautical Systems Engineering Technology*, 2021, 5(5): 66-74. (in Chinese)
- [2] 张楠. 深蓝航天:公里级垂直火箭回收只是起步[N]. 中国科学报, 2022-06-20.
ZHANG N. Deep Blue Aerospace: Kilometer-level vertical rocket recovery is just the beginning [N]. *China Science Daily*, 2022-06-20. (in Chinese)
- [3] 朱沛霖等. “垂直回收火箭着陆缓冲装置动力学研究”[C]. 第十二届多体动力学与控制暨第七届航天动力学与控制第十五届全国分析力学联合学术会议会议, 2021.
ZHU P L, et al. Kinetic study of landing buffer device for vertical recovery rocket [C]. *The 12th Multibody Dynamics and Control and the 7th Aerospace Dynamics and Control and the 15th National Joint Conference on Analytical Mechanics*, 2021. (in Chinese)
- [4] PARK S, YU S, KIM M, et al. Dual autoencoder network for retinex-based low-light image enhancement [J]. *IEEE Access*, 2020, 8: 22084-22093.
- [5] HE K M, SUN J, TANG X O. Single image haze removal using dark channel prior [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2011, 33(12): 2341-2353.
- [6] TAN R T. Visibility in bad weather from a single image [C]. 2008 *IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*. Anchorage, AK, USA. IEEE, 2008: 1-8.
- [7] FATTAL R. Single image dehazing [J]. *ACM Transactions on Graphics*, 2008, 27(3): 1-9.
- [8] BERMAN D, TREIBITZ T, AVIDAN S. Non-local image dehazing [C]. 2016 *IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*. Las Vegas, NV, USA. IEEE, 2016: 1674-1682.
- [9] 颜廷龙, 李瑛, 王凤芹. 基于 MRF 模型的飞机飞行动作识别划分算法 [J]. 计算机工程与科学, 2022, 44(1): 159-164.

- YAN T L, LI Y, WANG F Q. Recognition and division of aircraft flight action based on MRF model [J]. *Computer Engineering & Science*, 2022, 44 (1): 159-164. (in Chinese)
- [10] 刘国, 吕群波, 刘扬阳. 基于自适应暗原色的单幅图像去雾算法[J]. *光子学报*, 2018, 47(2): 0210001.
LIU G, LÜ Q B, LIU Y Y. Single image dehazing algorithm based on adaptive dark channel prior [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2018, 47 (2): 0210001. (in Chinese)
- [11] VIEIRA LOPES N, MOGADOURO DO COUTO P A, BUSTINCE H, *et al.* Automatic histogram threshold using fuzzy measures [J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2010, 19(1): 199-204.
- [12] DJEMA A, CHIBANI Y. Binarization of historical documents using self-learning classifier based on K-Means and SVM[C]. 21st European Signal Processing Conference (EUSIPCO 2013). Marrakech, Morocco. IEEE, 2013: 1-5.
- [13] 梁肇峻, 钟俊. 基于Otsu算法与直方图分析的自适应Canny算法的改进[J]. *现代电子技术*, 2019, 42(11): 54-58.
LIANG Z J, ZHONG J. Adaptive Canny algorithm improvement based on Otsu algorithm and histogram analysis [J]. *Modern Electronics Technique*, 2019, 42(11): 54-58. (in Chinese)
- [14] OTSU N. A threshold selection method from gray-level histograms [J]. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, 1979, 9(1): 62-66.
- [15] ROSENFELD A, PFALTZ J L. Sequential operations in digital picture processing [J]. *Journal of the ACM*, 1966, 13(4): 471-494.
- [16] 张国和, 徐快, 段国栋, 等. 一种适于硬件实现的快速连通域标记算法[J]. *西安交通大学学报*, 2018, 52(8): 95-101.
ZHANG G H, XU K, DUAN G D, *et al.* A fast labeling algorithm of connected components applicable for hardware implementation [J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2018, 52(8): 95-101. (in Chinese)
- [17] CHANG F, CHEN C J, LU C J. A linear-time component-labeling algorithm using contour tracing technique [J]. *Computer Vision and Image Understanding*, 2004, 93(2): 206-220.
- [18] GRANA C, BORGHESANI D, CUCCHIARA R. Optimized block-based connected components labeling with decision trees [J]. *IEEE Transactions on Image Processing: a Publication of the IEEE Signal Processing Society*, 2010, 19 (6): 1596-1609.
- [19] 郭仕杰, 付茂洛. 基于双目视觉系统的测距研究 [J]. *中国民航飞行学院学报*, 2022, 33(2): 26-30.
GUO S J, FU M M. Climatic features of southeast coastal areas and its influence to helicopter [J]. *Journal of Civil Aviation Flight University of China*, 2022, 33(2): 26-30. (in Chinese)
- [20] 蔡迅华, 李明懋. 基于单目测距方法的自动导引小车导航系统 [J]. *自动化应用*, 2021(5): 68-70.
CAI X H, LI M M. Navigation system of automatic guided vehicle based on single visual distance method [J]. *Automation Application*, 2021 (5): 68-70. (in Chinese)
- [21] 冯肖维, 谢安安, 肖健梅, 等. 非合作纹理目标单目位姿计算 [J]. *光学精密工程*, 2020, 28(8): 1775-1784.
FENG X W, XIE A A, XIAO J M, *et al.* Monocular pose calculation of non-cooperation textured object [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2020, 28(8): 1775-1784. (in Chinese)
- [22] FISCHLER M A, BOLLES R C. *Random Sample Consensus: A Paradigm for Model Fitting with Applications to Image Analysis and Automated Cartography* [M]. Readings in Computer Vision. Amsterdam: Elsevier, 1987: 726-740.
- [23] BRIALES J, KNEIP L, GONZALEZ-JIMENEZ J. A certifiably globally optimal solution to the non-minimal relative pose problem [C]. 2018 *IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*. Salt Lake City, UT, USA. IEEE, 2018: 145-154.
- [24] 刘文瀚, 孙凌宇, 李庆翔, 杜小禹, 王威, 秦红亮. 视觉和激光雷达里程计紧耦合的SLAM算法研究 [J]. *激光与光电子学进展*, 2023, 60(14): 358-368.
LIU W H, SUN L Y, LI Q X, DU X Y, WANG W, QIN H L. SLAM algorithm with tight coupling of vision and lidar odometer [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2023, 60 (14): 358-368. (in Chinese)
- [25] 朱林梅, 董秀成, 张征宇, 等. 面向奇异构型目标点分布的相机位姿估计算法 [J]. *光子学报*,

- 2021, 50(7): 0715001.
- ZHU L M, DONG X C, ZHANG Z Y, *et al.* Camera pose estimation algorithm for singular configuration of target points[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2021, 50(7): 0715001. (in Chinese)
- [26] 刘松林, 哈长亮, 郝向阳, 等. 基于机器视觉的线阵CCD相机成像几何模型[J]. 测绘科学技术学报, 2006, 23(5): 387-390.
- LIU S L, HA C L, HAO X Y, *et al.* Line scanor camera" s imaging model based on machine vision [J]. *Journal of Geomatics Science and Technology*, 2006, 23(5): 387-390. (in Chinese)
- [27] WANG D Q, JI Q, HUANG BR, *et al.* Polarization-based smoke removal method for surgical images [J]. *Biomed. Opt. Express* 13, 2364-2379 (2022)
- [28] XU W, CHEN R W, ZHOU Q B, *et al.* Image degradation modeling for real-world super resolution via conditional normalizing flow [J]. *Applied Sciences*, 2021, 11(11): 4735.
- [29] 王娟, 刘远远, 张馨午, 等. 雾霾图像中大气光值估计方法综述[J]. 激光杂志, 2021, 42(9): 6-10.
- WANG J, LIU Y Y, ZHANG X W, *et al.* Summary of atmospheric light value estimation methods in haze images [J]. *Laser Journal*, 2021, 42(9): 6-10. (in Chinese)
- [30] WANG Z, BOVIK A C, SHEIKH H R, *et al.* Image quality assessment: from error visibility to structural similarity [J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2004, 13(4): 600-612.
- [31] 孙传富, 彭涛, 陆永刚, 等. 连铸坯三维测量多线结构光的中心条纹快速提取[J]. 光学精密工程, 2023, 31(3): 380-392.
- SUN C F, PENG T, LU Y G, *et al.* Fast extraction center stripe of multi-line-structured light for three-dimensional measurement of casting slab [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2023, 31(3): 380-392. (in Chinese)
- [32] 徐寒. 基于高斯曲面拟合的扩展目标跟踪算法研究[D]. 银川: 宁夏大学, 2022.
- XU H. *Research on extended target tracking algorithm based on Gaussian surface fitting* [D]. Yinchuan: Ningxia University, 2022. (in Chinese)
- [33] 胡志阳, 谭佳源, 刘国华. 一种基于白平衡和多项式回归结合的中医望诊图像校正算法[J]. 南开大学学报(自然科学版), 2022, 55(4): 25-28, 37.
- HU Z Y, TAN J Y, LIU G H. A Chinese medicine diagnosis image correction algorithm based on white balance and polynomial regression [J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Nankaiensis*, 2022, 55(4): 25-28, 37. (in Chinese)
- [34] LAM E Y. Combining gray world and retinex theory for automatic white balance in digital photography [C]. *Proceedings of the Ninth International Symposium on Consumer Electronics*, 2005. (ISCE 2005), China. IEEE, 2005: 134-139.
- [35] 王迪, 袁三一, 王尚旭. 基于自适应阈值约束的无监督聚类智能速度拾取和动校正[C]. SPG/SEG 南京2020年国际地球物理会议论文集, 2020: 1025-1028.
- WANG D, YUAN S Y, WANG S X. Intelligent velocity picking and dynamic correction for unsupervised clustering based on adaptive threshold constraints [C]. *Proceedings of SPG/SEG 2020 International Geophysical Conference*, Nanjing, 2020: 1025-1028 (in Chinese)
- [36] 胡晋山, 康建荣, 张琪, 等. 一种八邻域图像边界追踪改进算法[J]. 测绘通报, 2018(12): 21-25.
- HU J S, KANG J R, ZHANG Q, *et al.* An improving image boundary tracking algorithm based on eight neighborhood [J]. *Bulletin of Surveying and Mapping*, 2018(12): 21-25. (in Chinese)
- [37] 叶声华, 郝继贵, 王仲, 等. 视觉检测技术及应用 [J]. 中国工程科学, 1999, 1(1): 49-52, 62.
- YE S H, ZHU J G, WANG Z, *et al.* Visual inspection technology and its application [J]. *Strategic Study of CAE*, 1999, 1(1): 49-52, 62. (in Chinese)
- [38] 全燕鸣, 黎淑梅, 麦青群. 基于双目视觉的工件尺寸在机三维测量[J]. 光学精密工程, 2013, 21(4): 1054-1061.
- QUAN Y M, LI S M, MAI Q Q. On-machine 3D measurement of workpiece dimensions based on binocular vision [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013, 21(4): 1054-1061. (in Chinese)
- [39] 黄桂平, 李广云, 王保丰, 等. 单目视觉测量技术研究 [J]. 计量学报, 2004, 25(4): 314-317.
- HUANG G P, LI G Y, WANG B F, *et al.* Evolution for monocular vision measurement [J]. *Acta Metrologica Sinica*, 2004, 25(4): 314-317. (in Chinese)
- [40] 张业鹏, 何涛, 文昌俊, 等. 机器视觉在工业测量中的应用与研究 [J]. 光学精密工程, 2001, 9

(4): 324-329.

ZHANG Y P, HE T, WEN C J, *et al.* Applications of machine vision in industry inspection and its research [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2001, 9 (4): 324-329. (in Chinese)

[41] 周芮, 刘延芳, 齐乃明, 等. 面向空间应用的视觉

位姿估计技术综述[J]. 光学精密工程, 2022, 30 (20): 2538-2553.

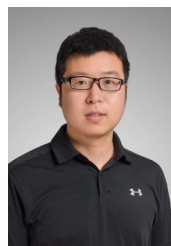
ZHOU R, LIU Y F, QI N M, *et al.* Overview of visual pose estimation methods for space missions [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2022, 30 (20): 2538-2553. (in Chinese)

作者简介:



路 荣(1999—),男,甘肃会宁人,硕士研究生,2021在齐齐哈尔大学获得学士学位,2024年在中国科学院大学获得硕士学位,主要研究方向为图像处理及视觉测量技术。E-mail: 2297168491@qq.com

通讯作者:



张高鹏(1989—),男,陕西宝鸡人,博士,副研究员,博士生导师,2020年于西安交通大学获博士学位,研究方向为航天特种光学成像与视觉测量技术, E-mail:zhanggaopeng@opt.ac.cn