

基于光场统计的机场飞鸟目标检测

刘国春^{1*}, 黄胜¹, 魏桂明¹, 郑伟², 李明涛²¹中国民用航空飞行学院航空工程学院, 四川 广汉 618307;²中国科学院国家空间科学中心, 北京 100190

摘要 鸟击作为影响机场安全的主要事故征候,需要准确、稳定的弱小运动目标检测方法用于机场飞鸟检测。应用光场涨落增强低信噪比的飞鸟运动特征信号,再结合局部高斯混合模型对图像增强区域进行前景分割处理,实现宽视场复杂背景下的机场飞鸟目标检测,并完成不同光照条件的机场飞鸟检测实验。实验结果表明:所提算法较传统算法能有效提高机场条件下的远距离、宽视场、低信噪比弱小目标检测率,且具有较好的光学稳定性。

关键词 图像处理; 低信噪比; 光场涨落; 局部高斯混合模型; 宽视场; 弱小运动目标

中图分类号 V19

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP222086

Airport Bird Target Detection Based on Light Field Statistics

Liu Guochun^{1*}, Huang Sheng¹, Wei Guiming¹, Zheng Wei², Li Mingtao²¹College of Aviation Engineering, Civil Aviation Flight University of China, Guanghan 618307, Sichuan, China;²National Space Science Center, Chinese Academy of Science, Beijing 100190, China

Abstract Airport bird detection requires a precise and reliable detection method for small and weakly moving targets because bird strikes are the primary accident sources affecting airport safety. The airport bird detection was realized under a wide field of view and against a complex background after completing experiments under various lighting conditions. The light field fluctuations were used to enhance the low signal-to-noise ratio of the bird motion characteristic signal, and the local Gaussian mixture model was used to segment the foreground of the image enhancement area. The experimental findings demonstrate the effectiveness of the proposed algorithm in increasing the detection rate of dim small targets with long distances, a wide field of view, and low signal-to-noise ratios while having better optical stability.

Key words image processing; low signal-to-noise ratio; light field fluctuation; local Gaussian mixed model; wide view field; little moving object

1 引言

鸟击事件通常指飞鸟或蝙蝠在航空器起飞、降落、巡航中发生干扰或碰撞^[1],是近年来民用航空器的最大事故症候^[2]。传统的机场飞鸟检测措施主要依靠人工或探鸟雷达^[3]。探鸟雷达基于飞鸟的速度、高度^[4]等诸多重要特性建立检测方法,但是目前的探鸟雷达在飞鸟检测中的实际探测率低于75%^[5],尤其在对体型较小、信噪比低的飞鸟有较高的漏检率和虚警率,而且具有价格昂贵、主动发射信号可能干扰机场航空器运行等缺点。

在光学探鸟方面,国内外学者进行了大量的研究。文献[6]利用双目摄像头建立野外飞鸟监控设备,并结合背景抑制与双目视觉定位原理对拍摄到的运动飞鸟进行距离及高度测算。文献[7]利用数码单反相机作为远程图像传感器捕捉公园内秋季迁徙的候鸟图像,并结合阈值分割和感兴趣区域划分建立飞鸟数量矩阵,以此监测公园内迁徙候鸟数量。文献[8]使用支持向量机,从基于卷积神经网络(CNN)的检测器和全卷积网络中提取运动飞鸟和检测环境中不同类型的深度特征,对大型风力发电机附近的飞鸟进行检测,结果验证了多个深度卷积特征组合对飞鸟检测的有效性。文

收稿日期: 2022-07-15; 修回日期: 2022-08-09; 录用日期: 2022-08-20; 网络首发日期: 2022-08-29

基金项目: 中国科学院重点部署项目(KFZD-SW-438)、中国民用航空飞行学院研究生创新基金(XSY2022-13)、大学生创新创业项目(S202110624119)

通信作者: liuguochun@cafuc.edu.cn

献[9]对农业领域中有害的飞鸟进行检测,首先基于高斯混合模型进行图像背景剔除、运动飞鸟分割,再利用目标物颜色特征和中值滤波去除图片中非目标物,在完成预处理后利用神经网络目标分类器对最小化的运动目标进行分类检测。文献[10]基于卷积神经网络提出全动态环境下图像预处理的鸟类检测方法,再结合 Inception-v3 神经网络模型增强小目标飞鸟的分类准确性,但该算法受光照变化影响较大。文献[11]利用 pixel-based adaptive segmenter(PBAS)算法对输电线路场景下的目标飞鸟进行检测,并利用决策阈值进一步增加对背景复杂度的受韧性广度,能有效提高飞鸟检测率。但上述光学探鸟方法均为近距离小视场的飞鸟检测,机场范围的低信噪比运动飞鸟检测,属于宽视场下的弱小运动目标检测,传统的基于形状特征成像的目标检测算法对目标的信噪比要求较为苛刻,容易造成对远距离、宽视场中低信噪比目标的高虚警率和高漏检率,而且在对低信噪比目标检测时,算法的光照变化抗性较低,算法鲁棒性容易受影响^[12-13]。

综上所述,针对民航机场光学探鸟的宽视场、远距离、低信噪比的特点,本文提出一种适用于宽视场、低信噪比、高光学稳定性的检测算法,以提高机场对外来飞行物的监控与预警能力,保障机场运行安全。

2 所提算法概述

机场飞鸟检测需要解决低信噪比信号在复杂背景下检测精度低以及宽视场大图幅的计算量高的问题。所提算法核心思想是利用低信噪比运动目标通过检测背景时会对低动态背景噪声造成时序上的扰动,从而使背景的统计特征发生变化,根据统计特征的扰动和变化情况进行目标信号增强统计分析,同时划定信号增强的周边局部区域,对该局部区域利用高斯混合模型(GMM)进行前景运动目标提取,从而达到快速、精准获取宽视场、低信噪比检测目标的效果,具体流程如图 1 所示。

2.1 低信噪比运动目标信号增强与噪声处理

在远距离大视场低信噪比运动目标的检测中,首先要考虑的是提高运动目标信噪比。对于远距离大视场下的运动飞鸟,其信噪比极低,本身能量微弱,此时得到的光子图像与传统的灰度图像在分布上大相径庭,其信号特征表现出离散性且在时序上满足概率分布^[14],鉴于上述特征,本研究基于低信噪比运动飞鸟的离散特性和分布概率特性进行统计分析。

此外,光子图像中会出现一些随机分布的噪声,目标信号通常会被噪声淹没,二者极难区别。在此种情况下,图像中的运动目标信号和背景噪声都较小,两者的光子分布情况都近似于泊松分布^[15-16]。这时,可利用统计检测的方法从时序维度处理目标信号,既能增强弱小运动目标的信噪比,又能减少背景和噪声的影响。

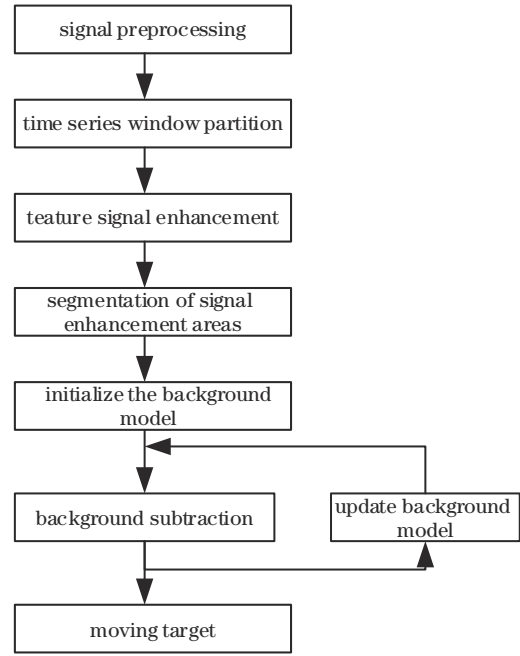


图 1 检测算法流程图

Fig. 1 Flow chart of detection algorithm

首先热辐射光(自然光)积分光强的概率分布函数为

$$P(\omega) = \frac{1}{\omega} \exp\left(-\frac{\omega}{\bar{\omega}}\right), \quad (1)$$

式中: ω 为光强; $\bar{\omega}$ 为光强平均值; $P(\omega)$ 为光强概率。对式(1)进行泊松变化,有

$$P(n) = \int_0^{\infty} \frac{1}{\omega} \exp\left(-\frac{\omega}{\bar{\omega}}\right) \frac{(\eta\omega)^n}{n!} \exp(-\eta\omega) d\omega, \quad (2)$$

式中: η 为光学探测器的量子效率; $n=\eta\omega$,是检测到的光强数值; $P(n)$ 为积分能量数值的概率分布。在低信噪比运动目标检测中,低动态稳定背景的信号起伏在时序上的统计分布能验证其分布和变化。运动目标穿过图像中处于动态稳定的噪声和背景时,由目标运动带来的关联瞬时涨落也耦合在整个光场中,进而导致噪声信号和低动态背景的稳态分布发生区域变化,因此能够从区域涨落变化中换算出运动目标的信息,进而对弱小运动目标进行信号增强。光子涨落量^[17]的表达式为

$$\Delta n_k = \left[\sum_{i=1}^k (n_i - \bar{n})^2 \right] P_i, \quad (3)$$

式中: Δn_k 表示检测长度为 k 的时序信号的光子动态涨落值; n_i 为光子在时序信号上的测量数值, \bar{n} 为其均值; P_i 表示 n_i 事件的概率分布。

根据式(3)将相等时序长度的待检测信号作差,定义相等时序长度窗口的光子涨落量为

$$\Delta(n_k - n_{ck}) = \sqrt{\sum_{i=1}^k (D_i^2 P_{n_i - n_{i+k}})}, \quad (4)$$

式中, D_i 为相等时序长度窗口的测量值与均值之差。

$$D_i = \left[(n_i - n_{i+k}) - \overline{n_k - n_{tk}} \right]^2, \quad (5)$$

将式(4)代入式(2),得到相等时序长度窗口的光强:

$$P_{n_i - n_{i+k}} = \frac{(\overline{\eta n_k - n_{tk}})^k}{k!} \exp(-\overline{\eta n_k - n_{tk}}). \quad (6)$$

不同光强条件下低信噪比运动目标的检测中, $\Delta(n_k - n_{tk})$ 能够表示时序信号上的起伏特征,通过提取该起伏特征可对应将待检测区域的信号进行增强处理,同时放大检测信号与抑制背景噪声,获取较为准确的低信噪比目标。

2.2 宽视场运动目标前景提取

在完成低信噪比目标信号增强后,若直接对机场成像图进行前景分割,由于检测视场太大同时检测目标太小,在分割背景时会将前景运动目标混入背景,从而出现微小暗弱目标漏检情况。首先对输入待检测信号进行增强区域划分,统计飞鸟运动造成的光场信号涨落,出现涨落值的区域划定为信号增强区域,未发现涨落值的区域划定为信号非增强区域,再对信号增强区域利用高斯混合模型进行检测。GMM是多个高斯函数的权值之和,所取视频帧中的某一个像素点在时序上构成像素过程如下:

$$(\mathbf{X}_1, \mathbf{X}_2, \dots, \mathbf{X}_t) = [I(x, y, i), 1 \leq i \leq t], \quad (7)$$

式中: (x, y) 为信号增强域视频帧图像中的某一点; i 为信号增强区域视频帧数; $I(x, y, i)$ 为视频第 i 帧的所在位置像素点灰度值; \mathbf{X}_t 是在 GMM 对动态场景的描述中,对动态场景中每个像素点构建 K 个单高斯模型混合而成的模型。

$$p(\mathbf{X}_t) = \sum_{i=1}^K \varpi_{i,t} \gamma(\mathbf{X}_t, \boldsymbol{\mu}_{i,t}, \boldsymbol{\Sigma}_{i,t}), \quad (8)$$

式中: K 为 GMM 的分布状态总数; $\varpi_{i,t}$ 、 $\boldsymbol{\mu}_{i,t}$ 、 $\boldsymbol{\Sigma}_{i,t}$ 分别为 t 时刻下模型中第 i 个高斯分布的权重、均值及协方差; $\gamma(\mathbf{X}_t, \boldsymbol{\mu}_{i,t}, \boldsymbol{\Sigma}_{i,t})$ 是在 t 时刻下模型的第 i 个高斯分布的概率密度函数,其表达式为

$$\gamma(\mathbf{X}_t, \boldsymbol{\mu}_{i,t}, \boldsymbol{\Sigma}_{i,t}) = \frac{1}{2\pi^{\frac{n}{2}} |\boldsymbol{\Sigma}_{i,t}|^{\frac{1}{2}}} \exp \left[-\frac{1}{2} (\mathbf{X}_t - \boldsymbol{\mu}_{i,t})^T \boldsymbol{\Sigma}_{i,t}^{-1} (\mathbf{X}_t - \boldsymbol{\mu}_{i,t}) \right]. \quad (9)$$

为减少计算过程中的时间复杂度,假设图像中的 RGB 三个分量相等且互相独立,则协方差矩阵 $\boldsymbol{\Sigma}_{i,t}$ 为

$$\boldsymbol{\Sigma}_{i,t} = \sigma_i^2 \mathbf{I}, \quad (10)$$

式中: σ_i 为标准差; \mathbf{I} 为单位矩阵。

在检测信号增强后的运动目标判定中,由于机场环境噪声较复杂,可能会受到机场跑道周边树林晃动与天空中云层变化影响,需要及时对背景进行更新处理,本研究将当前帧像素与当前 K 个高斯模型逐一匹配,若匹配值在一定数值范围内即判定为背景。背景判定公式与判定条件如下:

$$|\mathbf{X}_t - \boldsymbol{\mu}_{i,t-1}| < 2.5\sigma_{i,t-1}, \quad (11)$$

若满足式(11),则对模型中的 $\boldsymbol{\mu}_t$ 、 $\varpi_{i,t}$ 、 σ_t^2 进行更新处理:

$$\boldsymbol{\mu}_t = (1 - \alpha)\boldsymbol{\mu}_{t-1} + \alpha\mathbf{X}_t, \quad (12)$$

$$\varpi_{i,t} = (1 - \alpha)\varpi_{i,t-1} + \alpha, \quad (13)$$

$$\sigma_t^2 = (1 - \alpha)\sigma_{t-1}^2 + \alpha(\mathbf{X}_t - \boldsymbol{\mu}_t)^T (\mathbf{X}_t - \boldsymbol{\mu}_t), \quad (14)$$

式中: α 为更新速率。

若匹配不成功,则减小高斯模型权重并重新判定:

$$\varpi_{i,t} = (1 - \alpha)\varpi_{i,t-1}. \quad (15)$$

当全部模型都逐一判断后,若和当前点都没有匹配的模型时,则按照 $\varpi_{i,t}/\sigma_{i,t}$ 从高到低进行排序,并进行归一化处理:

$$\varpi_{i,t} = \varpi_{i,t} / \sum_{i=1}^K \varpi_{i,t}. \quad (16)$$

归一化处理后,再用排在前面且最有可能成为背景分布的像素进行背景构建:

$$\mathbf{B} = \arg \min b \left(\sum_{i=1}^b \varpi_{i,t} > T \right), \quad (17)$$

式中: T 为比例阈值。如果 T 值选取过小,则模型退化成单高斯模型,会导致检测精度降低;如果 T 值选取较大,则模型的计算量会增加,会降低目标检测的实时性^[18]。由于需要兼顾飞鸟的检测效果和机场监测的时效性要求,本研究在多次测算后将 T 取较小值 0.25,可在达到检测精度的同时并提高检测速度。在局部混合高斯模型中,其检测效果取决于更新速率 α : 如 α 值过大,模型更新速率较快,但对噪声抑制效果较差;若 α 值较小,则模型背景更新速率较慢^[19-20],需要更长时间适应环境变化,算法检测性能、时效性会受影响。本研究中 α 取值为 0.01。

3 实验测试

为验证所提算法对机场飞鸟探测的效果,利用该算法对四川广汉机场跑道周边的飞鸟进行检测。

3.1 试验器材与场地

拍摄检测素材的设备为 Imagesource 33 GX290 GigE 黑白工业相机, Swinron 23 mm 焦距镜头。相机分辨率为 1920×1080 , 水平像素和垂直像素均为 $2.9 \mu\text{m}$, 采样帧频为 30 frame/s, 相机视场角度为 6.8° 。图 2 为机场拍摄飞鸟的双目相机实物图。

实验区域选在四川省广汉机场,其经度为



图 2 相机实物图

Fig. 2 Actual picture of camera

104.33°, 纬度为 30.94°。图 3 为在机场拍摄飞鸟时的现场图, 本研究检测的运动飞鸟主要分布在距离拍摄相机 600 m 左右的机场跑道边缘。



图 3 机场飞鸟拍摄现场图

Fig. 3 Bird shooting scene at airport

3.2 测试参量

针对检测算法的实验测试包括检测算法比对和光照稳定性校验。利用相机在机场拍到的飞鸟运动视频, 将所提检测算法与常用弱小运动目标检测的三帧差分法、Vibe 法进行检测效果比对。

光照稳定性校验时, 考虑到在宽视场中的运动飞鸟像素占比极低, 受光照影响较大, 为了检测所提算法的光照稳定性, 针对不同光照时间段的机场飞鸟视频进行检测。将光照时间 10 点—14 点区间归为强光照条件, 17 点—19 点归为弱光照条件, 采集视频时间段为夏季 8 月和冬季 12 月, 一共包含夏季和冬季强弱光环境下 4 组机场飞鸟实验矩阵, 如图 4 所示: A 为夏季强光组实验组, 光强等级最高; B 为夏季弱光实验组, 光强等级中等; C 为冬季强光实验组; D 为冬季弱光实验组, 光强等级最低。

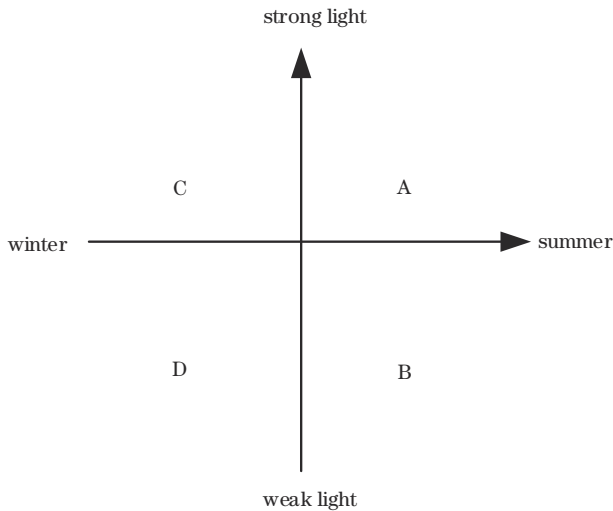


图 4 光照稳定性实验矩阵

Fig. 4 Experiment matrix of light stability

4 检测结果分析

为实现对机场控制区域内的微小运动目标检测, 本研究中相机的设计参量设置如下: 检测距离小于等

于 600 m, 目标检测像素大于等于 1。4 组飞鸟检测数据来自四川广汉机场, 根据广汉机场生态学统计, 入侵飞鸟主要为麻雀和云雀, 平均体长在 14~18 cm 之间。当入侵运动飞鸟距相机距离在 600 m 内时, 根据距离不同在相机上成像的像素数量在 1~4 之间, 所提算法能够对拍摄到的运动飞鸟轨迹进行有效检测。当运动飞鸟的距离超过 600 m 后, 目标飞鸟在相机上的像受相机硬件参数影响会成为亚像素, 此类情况不在本研究的检测范围内。

将每组 30 帧的 4 组机场飞鸟视频导入 3 种比对算法中, 得到飞鸟检测结果。图 5 为夏季强光检测结果, 图 6 为夏季弱光检测结果, 图 7 为冬季强光检测结果, 图 8 为冬季弱光检测结果, 图中的方框内为检测到的飞鸟轨迹。

由图 5 可知, 该图中飞鸟高度位于较低位置, 地面和空中各占一半的图幅, 传统的三帧差分法和 Vibe 法均将大量的地面背景作为噪声显示, 使得飞鸟运动目标难以辨识, 而所提方法通过背景检测判定能够很好地去除背景, 只显示飞鸟运动目标。图 6 的场景主要是天空背景, 三帧差分法以及 Vibe 法的场景噪声相对较少, 但是仍然存在部分噪点影响检测。所提方法对飞鸟目标进行信号增强后, 背景噪点抑制得更好。从图 7 和图 8 的检测结果来看, 由于光照条件较差, 且目标飞鸟和拍摄相机的距离较远, 运动飞鸟的成像像素较少, 只占 1~2 pixel。虽然此时运动飞鸟的检测轨迹完整度有所下降, 但依然能检测到其主要运动轨迹, 说明所提方法在微小运动目标的检测上具有较高可靠性。

从光照稳定性上分析, 图 5、图 6、图 7 均处于光照较强的时间(夏季强弱光、冬季强光), 所提方法能够准确地检出运动目标, 而且将背景噪点完全抑制。在图 8 的冬季弱光条件下, 右下角出现了细微噪点, 说明所提方法在弱光环境下可能存在一定的噪点抑制瑕疵, 此时场景为冬季 12 月某阴天 18 点, 光照条件几乎是我国一年白天环境下的最低值, 说明该方法还是具有较好的光学稳定性, 能够适用于大多数机场白天光照环境。

从时效性上分析, 在每组 30 帧的 4 组不同光照环境检测视频中, 所提方法对每组的飞鸟检测耗时均在 3~5 s 之间, 在检测精度足够的前提下可通过减少帧频提高微小运动目标监测响应速度, 从而达到机场飞鸟监测预警的时效性要求。

为进一步量化检测率, 验证所提方法性能, 采用精準率($R_{\text{precision}}$)和召回率(R_{recall})作为评价标准^[21]。

$$R_{\text{precision}} = \frac{T_p}{T_p + F_p}, \quad (18)$$

$$R_{\text{recall}} = \frac{T_p}{T_p + F_n}, \quad (19)$$

式中: T_p 为正确检测为前景的数量; F_p 为背景错误被

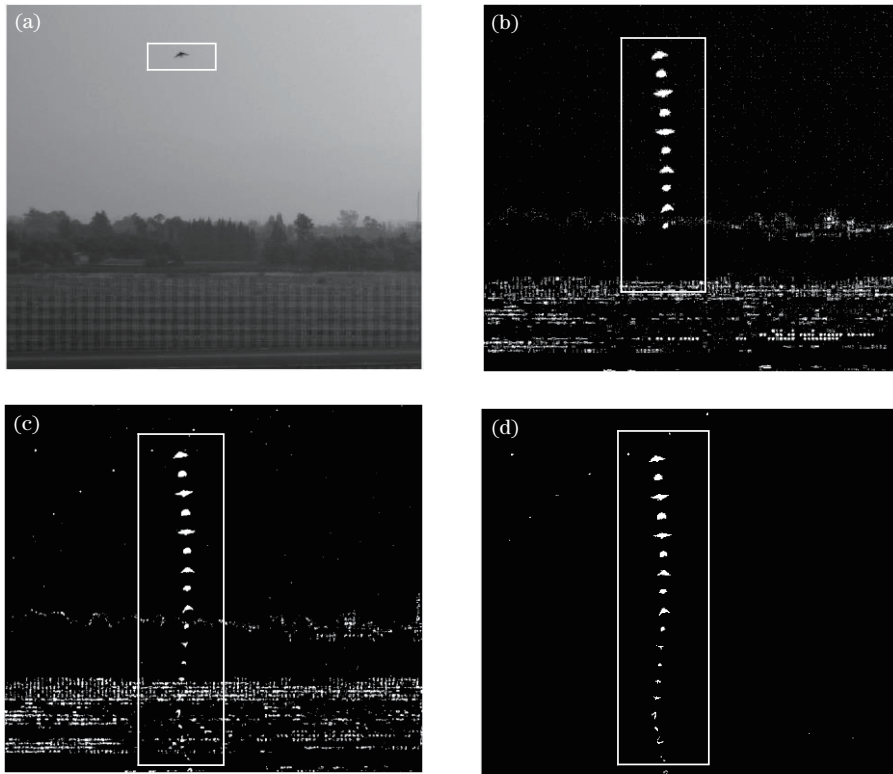


图 5 夏季强光飞鸟检测结果。(a)飞鸟原图;(b)三帧差分法;(c)Vibe法;(d)所提方法

Fig. 5 Results of bird detecting in summertime-strong light. (a) Original image of bird; (b) three frame differential method; (c) Vibe method; (d) proposed method

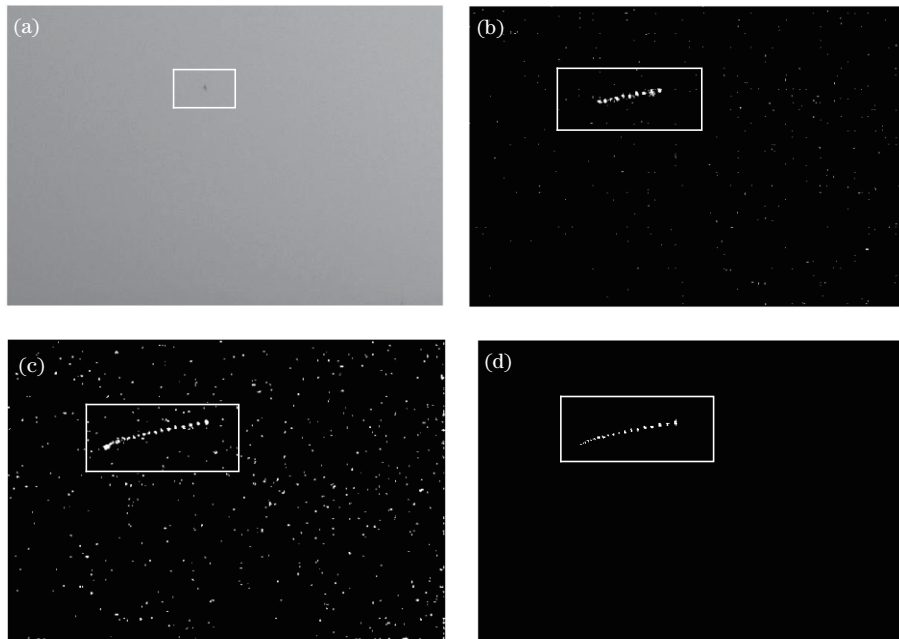


图 6 夏季弱光飞鸟检测结果。(a)飞鸟原图;(b)三帧差分法;(c)Vibe法;(d)所提方法

Fig. 6 Results of bird detecting in summertime-weak light. (a) Original image of bird; (b) three frame differential method; (c) Vibe method; (d) proposed method

检测为前景的数量; F_n 为前景被错误归类为背景的数量。

将三帧差分法、Vibe 与所提方法在 4 种不同光照环境(A 为夏季强光环境、B 为夏季弱光环境、C 为冬季

强光环境、D 为冬季弱光环境)下的 $R_{precision}$ 和 R_{recall} 进行对比, 结果如表 1 所示。

由表 1 可知, 从精准率上分析, 相较 Vibe 和三帧差分算法, 所提算法在 4 种不同光照环境中的检测精准

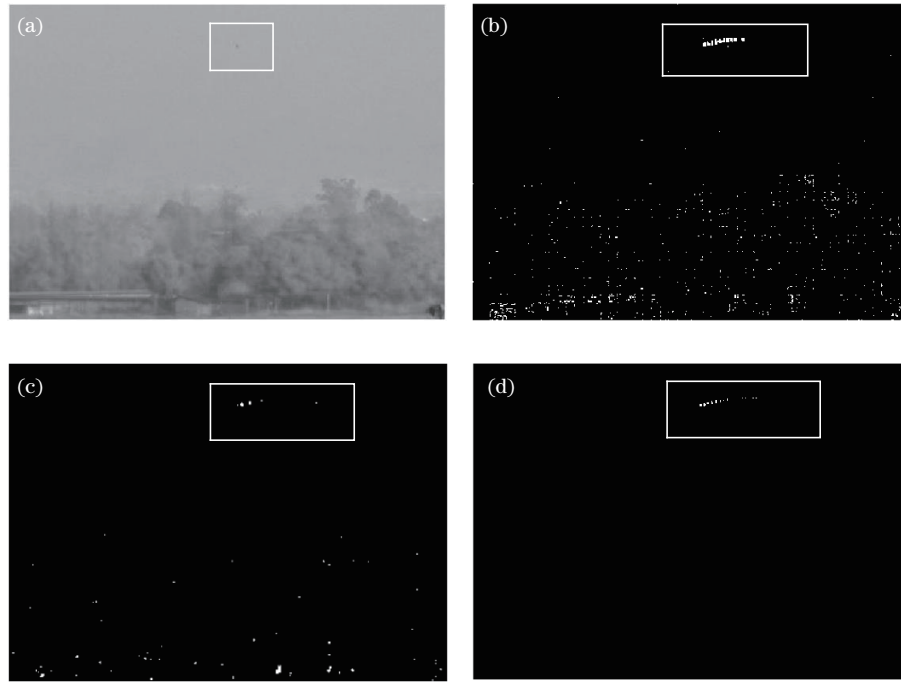


图 7 冬季强光飞鸟检测结果。(a)飞鸟原图;(b)三帧差分法;(c)Vibe法;(d)所提方法

Fig. 7 Results of bird detecting in wintertime-strong light. (a) Original image of bird; (b) three frame differential method; (c) Vibe method; (d) proposed method

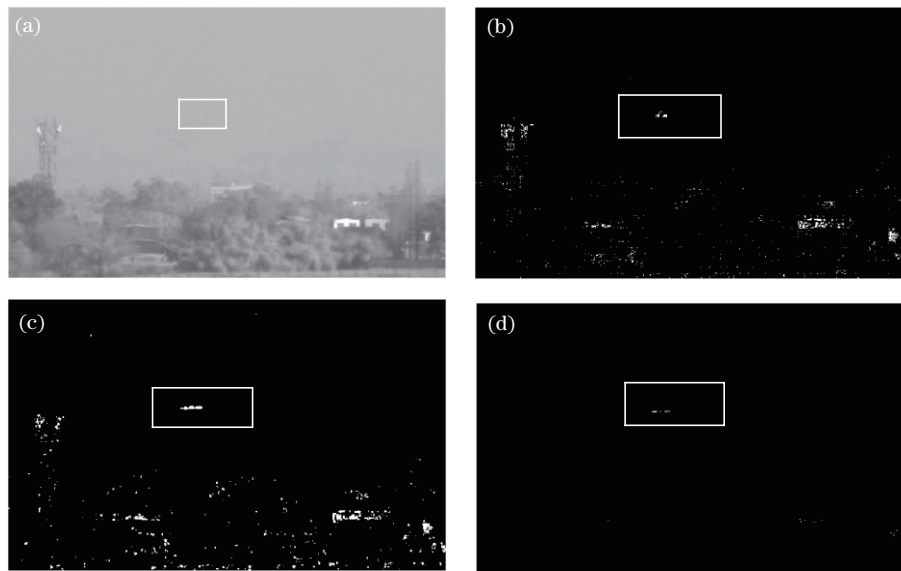


图 8 冬季弱光飞鸟检测结果。(a)飞鸟原图;(b)三帧差分法;(c)Vibe法;(d)所提方法

Fig. 8 Results of bird detecting in wintertime-weak light. (a) Original image of bird; (b) three frame differential method; (c) Vibe method; (d) proposed method

表 1 定量评价对比

Table 1 Comparison of quantitative evaluation

Testing environment	Three frame differential algorithm		Vibe algorithm		Proposed algorithm	
	$R_{precision}$	R_{recall}	$R_{precision}$	R_{recall}	$R_{precision}$	R_{recall}
A	0.73	0.39	0.75	0.42	0.88	0.53
B	0.65	0.32	0.69	0.41	0.85	0.55
C	0.54	0.33	0.63	0.39	0.82	0.48
D	0.55	0.28	0.66	0.36	0.78	0.46

率都有较大提升:在夏季强光环境的精准率达到 88%,夏季弱光环境精准率为 85%,冬季强光环境精准率为 82%,冬季弱光环境精准率为 78%,说明所提算法的检测效率高且具有较高的光学稳定性,能够有效适用于机场光照环境。再分析检测召回率,由于运动飞鸟检测目标相对于机场复杂背景下的像素占比太少,容易出现检测目标融入背景丢失检测目标的情况,所提算法在 4 种场景下的召回率最高值为 55%,最低值为冬季弱光环境的 46%,但仍然较大程度优于传统

检测算法。

综上所述,所提结合信号增强的局部混合高斯检测算法对机场范围的低信噪比运动飞鸟的检测精度高于三帧差分法和 Vibe 法,能够提升宽视场范围下的低信噪比运动目标检测性能。

5 结 论

针对机场宽视场微小运动目标检测,提出一种结合光场涨落目标信号增强和局部混合高斯前背景分割的检测方法。通过提取运动目标的光场涨落信号检测低信噪比运动目标,并对局部进行信号增强能够实现宽视场范围的低信噪比运动目标检测。所提混合高斯模型结合局部信号增强的检测算法,在不同光照条件下,具有较好的光照稳定性,且该算法较传统微小目标检测算法检测精度更好,对于民航机场范围内的飞鸟光学探测有较好的适用价值。

参 考 文 献

- [1] 刘国光, 杨跃敏, 刘斌, 等. 基于人工神经网络的机场鸟击风险预测[J]. 安全与环境学报, 2020, 20(2): 416-422.
Liu G G, Yang Y M, Liu B, et al. Prediction model of the bird strike risk in the airport sphere by using the artificial neural network[J]. Journal of Safety and Environment, 2020, 20(2): 416-422.
- [2] 苏秀, 朱曦. 鸟击防范研究[J]. 浙江林学院学报, 2009, 26(6): 903-908.
Su X, Zhu X. Prevention and control of birdstrike[J]. Journal of Zhejiang Forestry College, 2009, 26(6): 903-908.
- [3] 陈唯实, 黄毅峰, 陈小龙, 等. 机场探鸟雷达技术发展与应用综述[J]. 航空学报, 2022, 43(1): 184-204.
Chen W S, Huang Y F, Chen X L, et al. Development and applications of airport avian radar: review[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2022, 43(1): 184-204.
- [4] 陈小龙, 南钊, 张海, 等. 飞鸟与旋翼无人机雷达微多普勒测量实验研究[J]. 电波科学学报, 2021, 36(5): 704-714.
Chen X L, Nan Z, Zhang H, et al. Experimental research on radar micro-Doppler of flying bird and rotor UAV[J]. Chinese Journal of Radio Science, 2021, 36(5): 704-714.
- [5] 陈小龙, 陈唯实, 饶云华, 等. 飞鸟与无人机目标雷达探测与识别技术进展与展望[J]. 雷达学报, 2020, 9(5): 803-827.
Chen X L, Chen W S, Rao Y H, et al. Progress and prospects of radar target detection and recognition technology for flying birds and unmanned aerial vehicles [J]. Journal of Radars, 2020, 9(5): 803-827.
- [6] Verstraeten W W, Vermeulen B, Stuckens J, et al. Webcams for bird detection and monitoring: a demonstration study[J]. Sensors, 2010, 10(4): 3480-3503.
- [7] Poon W K, Wong C J, Abdullah K, et al. Development of migratory birds population monitoring system using digital single reflex camera[C]//CGIV '11: Proceedings of the 2011 Eighth International Conference Computer Graphics, Imaging and Visualization, August 17-19, 2011, Singapore. New York: ACM Press, 2011: 136-140.
- [8] Takeki A, Trinh T T, Yoshihashi R, et al. Combining deep features for object detection at various scales: finding small birds in landscape images[J]. IPSJ Transactions on Computer Vision and Applications, 2016, 8(1): 5.
- [9] Lee S, Lee M R, Jeon H, et al. Bird detection in agriculture environment using image processing and neural network[C]//2019 6th International Conference on Control, Decision and Information Technologies (CoDIT), April 23-26, 2019, Paris, France. New York: IEEE Press, 2019: 1658-1663.
- [10] Jo J, Park J, Han J, et al. Dynamic bird detection using image processing and neural network[C]//2019 7th International Conference on Robot Intelligence Technology and Applications (RiTA), November 1-3, 2019, Daejeon, Korea (South). New York: IEEE Press, 2019: 210-214.
- [11] 史娟丽. 复杂背景中弱小目标检测与追踪算法研究[D]. 西安: 西安科技大学, 2019.
Shi J L. Research on weak target detection and tracking algorithm in complex background[D]. Xi'an: Xi'an University of Science and Technology, 2019.
- [12] 邓世杰, 王海晏, 徐安, 等. 基于对抗生长的目标检测方法[J]. 光学学报, 2022, 42(2): 0210002.
Deng S J, Wang H Y, Xu A, et al. Target detection method based on antigrowth[J]. Acta Optica Sinica, 2022, 42(2): 0210002.
- [13] 刘荻, 张焱, 赵琰, 等. 基于特征重聚焦网络的多尺度近岸舰船检测[J]. 光学学报, 2021, 41(22): 2215001.
Liu D, Zhang Y, Zhao Y, et al. Multi-scale inshore ship detection based on feature re-focusing network[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(22): 2215001.
- [14] 赵磊, 俞信, 陈翼男, 等. 光子图像中基于广义似然比检验的目标探测方法[J]. 光学学报, 2010, 30(1): 91-96.
Zhao L, Yu X, Chen Y N, et al. Object detection method based on generalized likelihood ratio tests method in photon images[J]. Acta Optica Sinica, 2010, 30(1): 91-96.
- [15] 寇松峰. APD 光子计数成像技术研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2010.
Kou S F. Research on photon counting image technology based on APD[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2010.
- [16] 李尚儒, 葛鹏. 基于 Lucy-Richardson 算法的光子计数集成像[J]. 光学学报, 2021, 41(17): 1710001.
Li S R, Ge P. Photon counting integral imaging based on Lucy-Richardson algorithm[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(17): 1710001.
- [17] 邓昊, 郑伟, 李明涛, 等. 基于涨落分析的暗弱运动目标关联检测[J]. 光学精密工程, 2020, 28(11): 2517-2526.

- Deng H, Zheng W, Li M T, et al. Dim moving target detection based on fluctuation analysis[J]. Optics and Precision Engineering, 2020, 28(11): 2517-2526.
- [18] 刘江, 郭荣春, 王燕妮. 基于卡尔曼滤波的高斯混合模型目标检测算法[J]. 探测与控制学报, 2022, 44(2): 79-84.
Liu J, Guo R C, Wang Y N. A Gaussian mixture Kalman filter algorithm of target detection[J]. Journal of Detection & Control, 2022, 44(2): 79-84.
- [19] 刘非非. 基于视频监控的室内跌倒行为的检测与识别研究[D]. 济南: 山东大学, 2016.
Liu F F. Study of the detection and recognition of indoor fall behavior based on video monitoring[D]. Jinan: Shandong University, 2016.
- [20] 焦宾, 吕霞付, 陈勇, 等. 一种改进的自适应高斯混合模型实时运动目标检测算法[J]. 计算机应用研究, 2013, 30(11): 3518-3520.
Jiao B, Lü X F, Chen Y, et al. Improved algorithm of adaptive Gaussian mixture model for real-time moving object detection[J]. Application Research of Computers, 2013, 30(11): 3518-3520.
- [21] 毕国玲, 续志军, 陈涛, 等. 基于随机聚类的复杂背景建模与前景检测算法[J]. 物理学报, 2015, 64(15): 150701.
Bi G L, Xu Z J, Chen T, et al. Complex background model and foreground detection based on random aggregation[J]. Acta Physica Sinica, 2015, 64(15): 150701.