

基于深度学习的红外目标检测方法

蔡娟

(广州科技职业技术大学 信息工程学院, 广州 510005)

摘要: 由于背景的复杂性和小目标的多样性, 红外小目标已经成为一个挑战; 为了解决这个问题, 与传统方法不同的是, 提出一种基于密度-距离的最新检测方法; 首先, 对红外图像参数计算引信上的传感器以设置目标检测方法的边界限制; 其次, 提出了基于密度-距离空间的候选目标检测方法; 最后, 自适应像素生长 (APG) 算法用于抑制杂波, 从而检测出实际的目标; 利用真实红外图像数据库进行了仿真验证, 仿真和硬件在环实验实施以验证该方法的有效性; 结果表明, 红外图像引信上的传感器在弹丸旋转时具有稳定的视场, 可以清楚地看到观察红外小目标; 该方法具有较好的抗噪性, 不同大小的目标检测、多目标检测和杂波抑制能力; 实验结果表明, 该方法对多种不同场景中的信噪比较低的目标具有良好的检测效果, 平均检测概率达 84% 以上。

关键词: 红外图像传感器; 小目标检测; 密度距离空间; 杂波抑制

Infrared Target Detection Method Based on Deep Learning

CAI Juan

(College of Information Engineering, Guangzhou Vocational and Technical University of Science and Technology, Guangzhou 510005, China)

Abstract: Infrared small target has become a challenge due to the complex background and small target diversity. To solve this problem, there are different from traditional methods, a new detection method based on density-distance is proposed. Firstly, the sensor on the fuze is calculated for the infrared image parameters to set the boundary constraints of the target detection method. Secondly, a candidate object detection method based on density-distance space is proposed. Finally, an adaptive pixel growing (APG) algorithm is used to suppress the clutter and thus detect the actual target. The simulation is verified by using a real infrared image database, and the simulation and hardware-in-the-loop experiment verify the effectiveness of the method. The results show that the sensor on infrared image fuze has a stable field of view when the projectile rotates, and can clearly observe the small infrared target. The method has the characteristics of good anti-noise, target detection of different sizes, multi-target detection and various clutter suppression capabilities. Experimental results show that the method has good detection effect for targets with low SNR in many different scenes, and average detection probability is more than 84%.

Keywords: infrared image sensor; small target detection; density distance space; clutter suppression

0 引言

远距离探测红外小目标在许多国防和反恐应用中是一项至关重要的任务。在以往的研究中, 传统的检测方法无法有效检测复杂环境中的目标^[1]。因此, 提出主要旨在提高红外线的检测精度。弹道修正引信上的小目标。在各种检测方法中, 热红外成像是一种被动模式有效检测远距离小目标。为了检测红外小目标, 研究人员开发了基于图像处理 and 机器学习技术的多项开创性工作, 包括滤波、人类视觉系统 (HVS) 和低秩表示。然而, 这些传统方法有一些局限性。基于滤波的方法, 如顶帽滤波器^[2]和最大中值/最大均值滤波器^[3], 只能抑制均匀背景杂波, 但不能抑制复杂背景噪声, 导致高误报警率和性能不稳定。基于光谱残差的方法^[4]不能有效抑制背景中的杂波。基于局部对比

度的方法^[5]仅适用于高对比度目标, 而不是暗淡目标。基于低秩表示的方法可适用于低 SCR 的红外图像^[6], 但在复杂背景中具有小且变化形状目标的图像上仍然存在高误报警率。除上述问题外, 大多数传统方法严重依赖手工制作的功能, 这在处理具有挑战性的案例时是次优且无效的。此外, 手工特征的设计和超参数的调整需要专家知识和大量工程努力。Lu 等人^[7]考虑到目标检测问题的复杂海空环境, 采用了基于灰度腐蚀的边缘提取算法, 综合利用灰度填充实现边缘连接的目标。同时, 利用最大连通面积标记法识别目标。Dong 等人^[8]提出了一种自适应形态学选择方法, 并将原始视觉注意模型中的图像边界显著性衰减策略替换为边界显著性保留策略^[9]。结合自适应二值化方法, 在海天条件下准确检测出小目标。然而, 上述方法容易受到云和岛屿的影响, 这将导致小目标检测结果的漏报率更

收稿日期: 2022-09-02; 修回日期: 2022-10-17。

基金项目: 教育部协同育人项目 (201901240025; 202102186005; 202102211181)。

作者简介: 蔡娟 (1983-), 女, 江苏扬州人, 硕士研究生, 副教授, 主要从事计算机科学技术方向的研究。

引用格式: 蔡娟. 基于深度学习的红外目标检测方法[J]. 计算机测量与控制, 2023, 31(1): 45-50.

高。邓等人^[10]提出了一种通过多尺度模糊度量模型检测嵌入复杂背景中的小红外目标的有效方法,该模型可测量图像中目标的确定性。首先利用模糊度量消除背景杂波和噪声,然后采用简单的自适应阈值分割目标^[11]。虽然该方法有效,但会受到高亮度噪声的影响。

与可见图像相比传感器、雷达和激光^[12],红外图像传感器具有抗干扰能力强、隐蔽性好、全天候工作的能力。文献^[13]设计了一个校正引信并为红外图像传感器。但是,传感器的重要参数没有计算出来的。目标是使红外图像传感器和引信优雅地融合在一起这有利于目标检测。弹道修正引信可以通过增加圆误差概率(CEP)来降低对迫击炮的校正功能,无需对弹丸进行任何修改。一般来说,机载计算机根据检测到的目标方位角计算校正值^[14]。最近,基于目标特征的方法在各种目标检测任务中表现出了良好的性能,这些任务旨在构建局部显著性^[15]。这些方法的主要思想是利用空间域中的局部信息构建显著图,然后在显著图上通过阈值分割将红外目标与背景杂波区分开来。Han等人^[16]提出 IDoGb 来增强图像对比度,这种方法可以去除低频杂波,但不能有效滤除高频范围内的噪声和强杂波^[17]。Dong等人^[18]介绍了一种改进的 VAM,它大大提高了目标显著性,但耗时。此外,根据目标像素与相邻像素之间的差异,许多方法都侧重于基于局部对比度机制的目标显著性增强。例如,Chen等人^[19]提出了局部对比度测量(LCM),它适用于检测具有高局部对比度的目标。文献^[20]中,提出了改进的 LCM (ILCM),将图像划分为多个子图像块来计算显著图。ILCM 可以提高检测性能,但在高亮度复杂背景条件下,检测率较差。随后,研究人员相继提出了多种基于对比机制的红外目标检测方法^[21],包括 MPCM、NLCM、RLCM 等^[21]。例如,Wei等人^[20]提出了 MPCM 来计算多尺度图像块的中心块和背景之间的相似度。邓等^[22]利用局部熵对局部差异对比度进行了修正,利用目标与相邻背景之间的局部灰度差异特性,实现了目标增强和背景抑制。这些基于局部对比度的方法易于实现,但对背景复杂、杂波强的红外图像检测性能较差,会导致较高

的误报率。为了解决这个问题,通过分析导数子带特性和周围区域的划分方案,提出了基于多向导数的加权对比度测量(MDWCM)^[23]来检测红外小目标。然而,对于强风条件下拍摄的红外海洋图像,强波的导数特性与小目标相似,可能会导致严重的误报。Zhao等人^[24]提出了多形态轮廓(MMP),以解决目标弱小的红外图像中背景杂波强度高的问题。然而,对于一些背景高度复杂的红外图像,检测性能可能会严重下降。

针对以上方法在红外图像检测中背景复杂情况下亮度不足检测效率低,依靠灰度和形状特征区分目标与杂波检测困难等问题,提出一种基于密度-距离的最新检测方法可以有效对复杂背景下红外小目标检测方法^[25]。如前所述,提出方法主要目标是有效检测小型红外目标在弹道修正引信的应用中,并通过实验证明提出方法可以处理与长距离、小变量大小相关的挑战和真实红外场景中的最小热特征。综合性能是优于现有方法。主要贡献包括:受过滤方法的启发,提出了一种新颖的二维密度-距离空间利用图像信息获取密度峰值像素。提出了一种新的像素生长方法,有效抑制杂波。然后从密度峰值像素中选择真实目标。弹道修正引信的适用性^[26]。特别是,提出方法相较于现有方法保持了在不增加处理时间的情况下具有良好的检测性能。

1 密度-距离检测方法

1.1 细粒度检测器

细颗粒探测器的网络结构与粗颗粒探测器相同。对于粗粒度检测器,目标可能存在于检测结果置信水平小于 P1 但大于 P2 的区域。由于目标太小或部分被遮挡,目标的识别精度将定性降低。粗颗粒探测器主要在 SSD 的基础上进行改进。原始 SSD 网络结构如图 1 所示。在这种方法中,使用卷积层较少的 AlexNet 替换 VGG16,并使用 3×3 替换 AlexNets 中较大的卷积内核,以减少后续附加网络层的数量。具体网络结构如图 2 所示。采用双三次采样的超分辨率技术^[27]对区域进行切割,以提高区域的分辨率。然后将

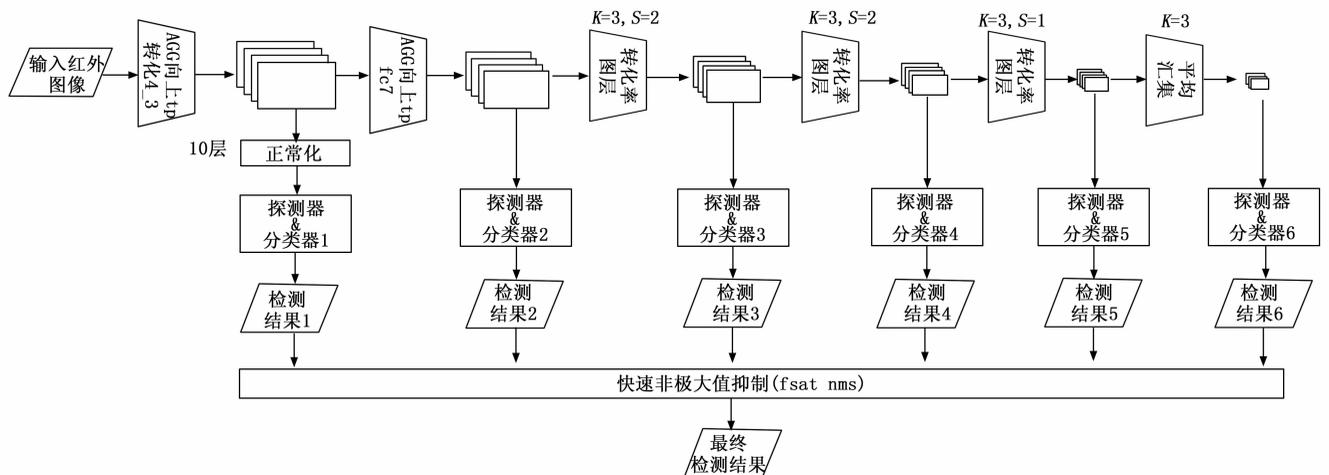


图 1 SSD 网络结构图

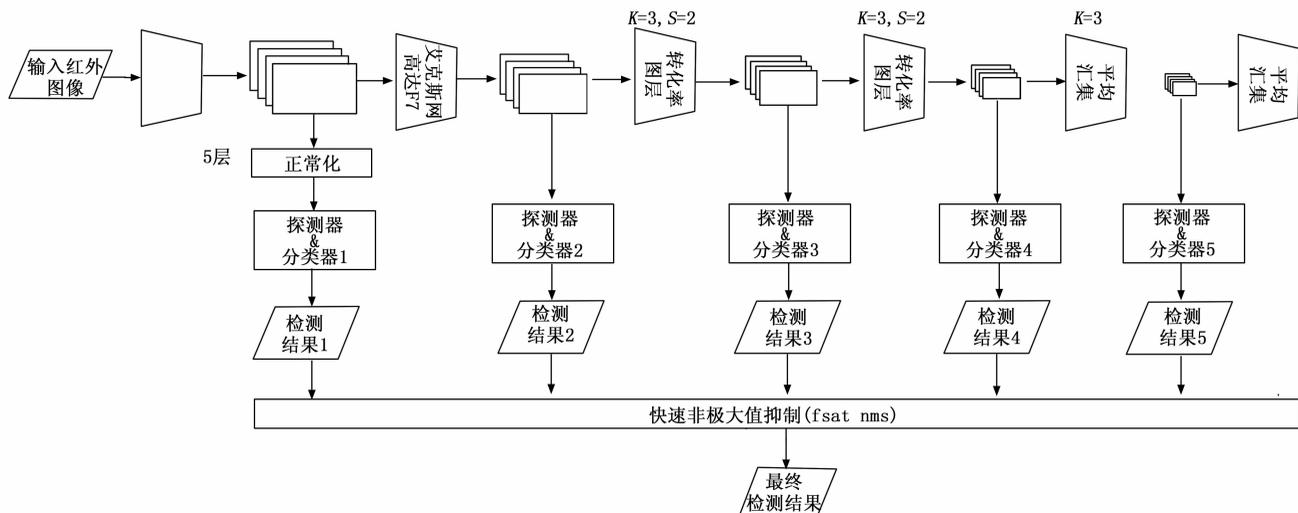


图 2 密度-距离检测方法网络结构图

该区域发送到细粒度检测器，以进行进一步的对象检测。当检测结果的置信值大于阈值 P1 时，将标记检测结果。最终检测结果结合了粗颗粒检测仪和细颗粒检测仪的检测结果。此操作仅进一步检测粗颗粒子检测器中难以检测的区域，并且只添加少量计算。

1.2 红外图像传感器与引信的连接

由于缺乏公共数据集，该领域的大多数最先进方法仍然是高度依赖于目标/背景假设的非学习和启发式方法。通常，大多数研究人员将单帧检测问题建模为各种假设下的离群点检测，例如，显著离群点^[28]，低秩背景中的稀疏离群点，平滑背景中的突出离群点^[29]。然后，可以通过显著性检测、稀疏和低秩矩阵/张量合成或局部对比度测量来获得异常值图。最后，在给定一定阈值的情况下，分割出红外小目标。当前遇到的主要挑战是不同目标与成像系统之间的距离可能不同，因此红外热成像相机在实际检测过程中接收不同的辐射能量。红外图像中捕获的海空区域的目标较小且模糊，更靠近成像系统的目标更大且更清晰。结果，目标不再具有单一特征。这给海空环境中的远程目标检测带来了更大的挑战。鉴于这种情况，查阅文献后没有具体的解决方案。因此，提出了一种新的红外海天环境搜索系统策略，通过收集所需的实验数据并进行分析，以实现准确检测任何目标这些方法存在对场景变化的不充分可辨别性和超参数敏感性。当迫击炮飞行在末端弹道时，弹道参数和红外图像传感器会直接影响检测效果。因此，检测算法应基于校正引信和红外图像的工作流程传感器。表 1 列出了常规迫击炮弹道参数和弹道参数选用的红外图像传感器。

根据迫击炮弹道方程，末端飞行时间一般为探测距离为 1 500 m，发射角为 53°时，8 s 内明显地，这个时间对于高 FPS 的算法来说已经足够了。然而，大部分时间都花在机载计算机计算和轨迹修正，留下很短的时间用于目标检测^[30]。同时，在末端轨迹开始时，俯仰弹丸的角度在积分

表 1 红外图像传感器参数

轨迹参数		红外成像仪	
检测距离/米	1 500	焦距/毫米	19
发射角度/度	53	像素间距/ μm	17
音高范围/度	60.3~65.2	视场/度	17×13
时间/秒	8	数组格式	320×240
初速度/(米/秒)	272	Spectral band/ μm	7.5~13.5

时间内迅速变化。这导致改变视野的背景。因此，经典的帧差法不应应用使用时域。合适的方法是检测目标单个图像。值得注意的是，在提出模型，红外图像传感器的参数选择基于在目标的大小，在目标之间的温差的前提下并且可以检测到背景。由于大多数电流的检测范围非制冷凝视微测辐射热计远大于 1 500 m，红外小目标在终端轨迹上的视野中清晰可见。然而，与导弹不同的是，迫击炮发射阶段造成的过载会损坏镜头组件。所以，使用稳定的同轴球面透镜组件。之间的转换关系红外图像传感器和目标计算如下：

$$\frac{R}{f} = \frac{H}{h} \tag{1}$$

$$Fov_{\text{col}} = 2\arctan\left(\frac{nd}{2f}\right) \tag{2}$$

$$Fov_{\text{row}} = 2\arctan\left(\frac{md}{2f}\right) \tag{3}$$

其中： f 是红外成像仪的焦距， R 和 H 是检测距离，目标的大小， h 是像素阵列上可检测目标的像素大小。这根据 Johnson Criteria 的检测程度，目标大小设置为 1-line pair。选择光谱带 7.5~13.5 μm 的长波传感器，因为热目标发射的波长约为 8~14 μm 。 Fov_{col} 和 Fov_{row} 是垂直和水平视野， n 、 m 和 d 代表数组格式和单个像素尺寸。这些参数用于计算等效检测实验红外图像传感器。一般来说，引信需要检测不同大小的多个目标^[31]。此外，由于检测距离长，目标通常只包含几个像素，并且不超过图像大小的 0.15%。

因此, 红外小目标检测提出了基于单幅图像的算法。该算法不应受到影响目标大小和背景。

1.3 自适应像素增长

值得注意的是, 真实目标的检测很容易混淆, 其中一些密度峰值位于某些背景区域的边缘。因此, 自适应像素增长 (APG) 算法用于消除虚假目标以保留真实目标。APG 方法类似于区域增长的方法。每个候选目标 (像素) 是被视为“种子”, 由 $T_k(x, y)$ 表示, 其中 k 是候选种子获得的数量, (x, y) 是像素的坐标。种子朝八字的方向生长相邻的连接像素。生长条件取决于灰度差异种子与其相邻像素之间。当差值小于阈值时, 种子长一级, 否则停止生长。用 Th 来表示自适应限制种子生长的阈值, 如式 (4) 和 (5) 所示:

$$Th = \eta \times (G_{T_k} - \bar{G}_{P_k}) \quad (4)$$

$$P_k(i, j) = \{(i, j) | x - m \leq i \leq x + m, y - n \leq j \leq y + n, m^2 + n^2 \neq 0\} \quad (5)$$

其中: P_k 表示 T_k 周围的像素, G_{T_k} 和 \bar{G}_{P_k} 代表灰度值 T_k 和像素 P_k 和 \bar{G}_{P_k} 是像素 P_k 的平均灰度值。 P_k 的范围是周围一定区域内但不包含种子的像素, 如式 (5) 所示。 m 和 n 为正整数, η 为阈值系数, 取值范围为 $0 \sim 1$, 即通过大量实验获得。经过一步像素增长后, T_k 扩展到集合 P_k 中的一个或多个像素。同样, 集合 P_k 中满足阈值 Th 成为新的种子。所有种子在每一步都遵循这个策略算法。当像素的扩张不能达到阈值 Th 时, 生长停止。这每个种子最终生长后的总像素数为面积 S_k 。图 3 展示了 APG 的过程。 T_k 是指数字 1 周围像素, P_k 是指数字为 2 的像素, 开始时有 3 个像素围绕 $T_1(x, y)$, 经过步骤一逐渐扩展到 3 个, 经步骤二逐步扩展到 9 个。

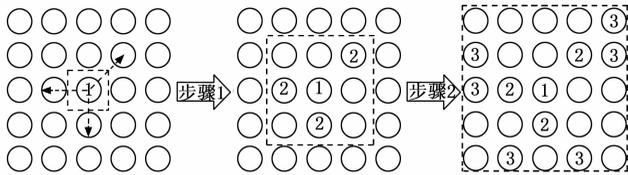


图 3 APG 方法的过程

2 实验与分析

本节首先对红外图像传感器的参数进行验证, 以确保表明校正引信可以清晰地捕获红外目标。然后, 通过仿真实验验证提出方法的有效性、稳健性和实时性能。有两个关键参数需要设置在接下来的实验中。首先, n 设置为 5, 因为目标的数量检测到的一般不超过 5。那么, 对于一个有几个像素的小目标, 种子周围的相邻像素的生长方向通常为 $3 \sim 5$, 占据 8 个方向的 $40 \sim 60\%$ 。因此, η 设置为 0.4 以限制真实的生长区域目标。在以下所有实验中, 不需要任何进一步的参数更改。

2.1 红外图像传感器检测能力等效实验

算法验证的前提是红外成像仪能够清晰观察红外小目标。为此, 应考虑等效尺寸和温差。使用 FLIR 红外成像仪

实验参数与表 2 相同。与一个连接的车辆模型用导电板代替红外靶材。温度 s 传感器由电池供电, 通过其与导电板连接自己的温度计。当周围环境温度 T_0 已知时, 温度传感器可以控制导电板的温度 T_1 保持温差 $(T_1 - T_0)$ 。搭载红外图像传感器由无人机实现远距离探测。显示了实验条件在表 2。

表 2 实验条件

实验性的条件	检测距离/米	目标尺寸/米	温差/K
真实情况	1 500	2.3	15
相同条件	65	0.1	7

根据数据, 坦克的尺寸特征为 2.3 m, 红外线的尺寸目标模型为 0.1 m。相应地, 当实际检测距离为 1 500 m 时, 等效距离不应小于 65 m。同样, 温差也应该是等价的, 但它与检测距离不是线性的。它需要是乘以大气透射系数 τa 。在参考文献 [8] 中, 范围云量差的情况下, τa 为 $0.3 \sim 0.7$ 。因此, τa 设置为 0.5, 基于平均来说。对于地面环境, 当两地温差车辆目标和周围环境平均为 15 K, 相当于温差为 7 K。

2.2 仿真结果分析

为了验证算法的有效性, 在研究过程中建立了仿真数据库。通过对已识别的目标和干扰进行半自动人工标注, 获得大量目标和干扰样本数据集。为了提高模型的泛化能力, 在样本的选择中综合考虑了各种环境因素。从每个场景中选择适当比例的正样本和负样本, 用保留法构建训练集 (70%) 和测试集 (30%)。为了真实有效地评估算法的性能, 选取具有代表性环境因素的图像进行测试, 并将传统算法的检测概率与现有算法的检测概率进行比较。提出算法检测概率定义为:

$$P_d = \frac{N_a}{N_b} \quad (6)$$

其中: N_a 是图像序列中检测到的真实目标的数量; N_b 是图像序列中目标的实际数量。在目标分类中, 研究人员关注现有目标的识别效果, 识别率一般指检测率。在满足要求的前提下, 最大限度地提高了算法的检测率, 天空背景检测率高达 99%。

表 3 不同复杂度场景的信噪比和检测概率

序号	背景类型	图像信噪比	传统算法检测概率	提出算法检测概率
场景 1	天空	2.47	0.62	0.88
场景 2	地面	2.64	0.55	0.83
场景 3	云层	2.32	0.50	0.82

2.3 算法模拟

为了用新算法进行比较, 即 Top-Hat 方法, 最少平方支持向量机方法 (LS-SVM)^[38], 基于高升压的多尺度局部对比度测量 (HBMLCM), 多尺度相对局部对比度测量 (RLCM)、多尺度基于补丁的对比度测量 (MPCM) 和最小高斯的局部拉普拉斯 (MinLocalLoG)。使用了接收器操

作符特征 (ROC) 曲线来比较算法的效果。ROC 是由真阳性率 (TPR) 和假阳性率 (FPR)，如下：

$$TPR = \frac{TurePositive}{TurePositive + FalseNegative} \quad (7)$$

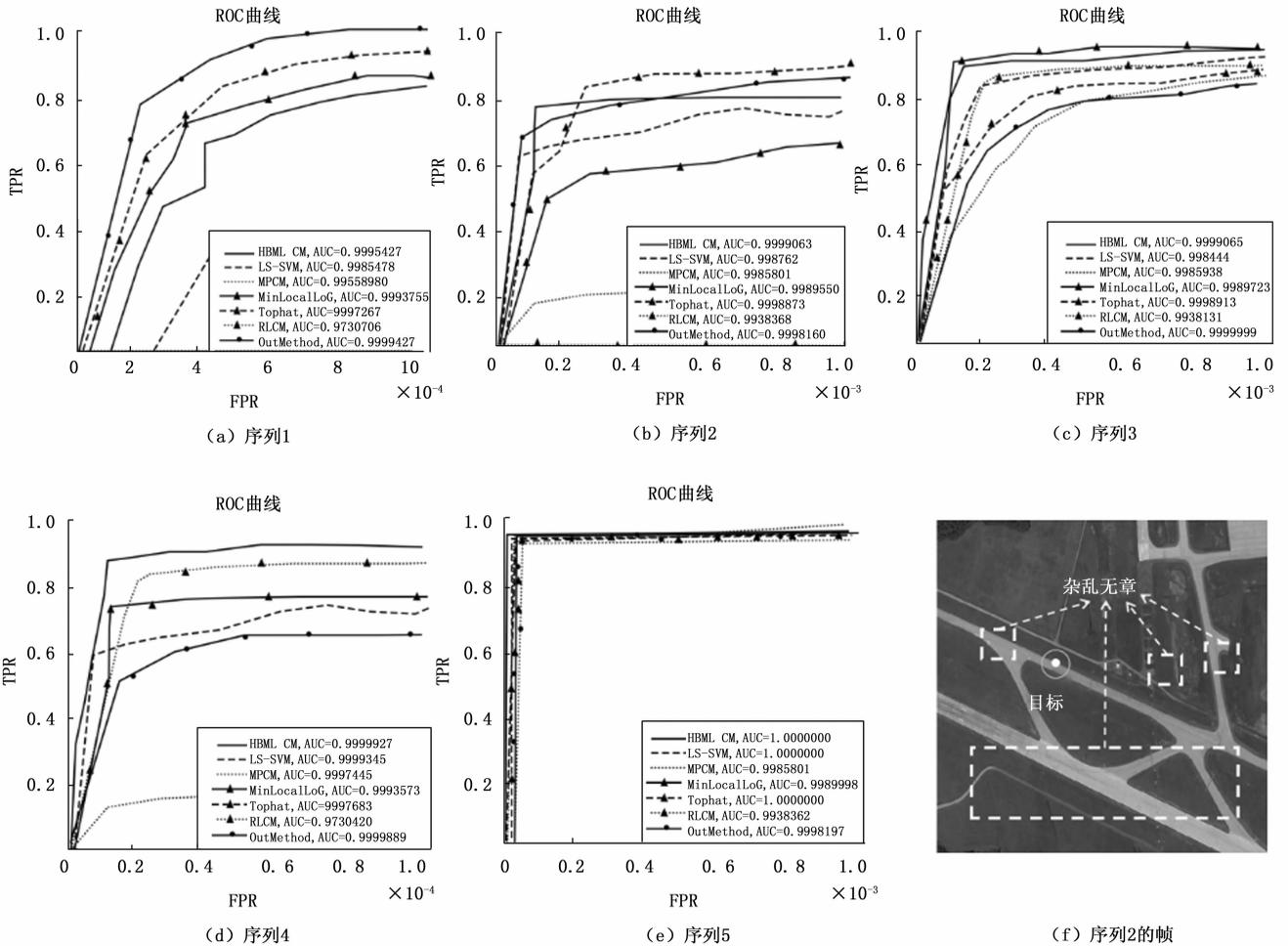
$$FPR = \frac{FalsePositive}{FalsePositive + TureNegative} \quad (8)$$

ROC 曲线以 FPR 为横坐标，TPR 为纵坐标，从而提供检测性能的定量比较。同时，该地区曲线下面积 (AUC) 是 ROC 曲线和横坐标轴所包含的面积和纵坐标。准备了 5 个不同的 200 帧数据集进行评估。每一帧只有一个具有相应坐标的真实目标。为了被认为是正确的结果，检测到的目标必须与真实目标的坐标相同。检出率可视为 AUC 值，即在 200 帧中检测到的真实目标的数量。同时，AUC 值越高在一帧中检测真实目标的性能更好。图 4 显示了 ROC 曲线和 AUC 值。红色虚线代表提出的算法。从所有 ROC 曲线可以看出，所提出的算法一般具有较高的检测精度。在序列 3~5 中，提出方法 AUC 值算法几乎接近 1。但是，序列 2 的检测精度并不理想。这是由于更多的杂波和较低的目标灰度。例如，第二个序列图 10 f 中的杂波多，面积小，

严重干扰像素增长的步骤。提出方法的 AUC 值为 6.02×10^{-5} 和 9.03×10^{-5} 降低高于 HBMLCM 和 LS-SVM。因此，提出方法的检测率略低比 LS-SVM 和 HBMLCM 差，但优于其他 4 种算法。然后，进行了运行时间测试。比较了时间消耗所有算法通过计算每个序列的 200 帧的平均时间，如所列。虽然提出算法的运行时间比其他 4 个慢算法，它不超过一个数量级并且具有更好的性能。总平均运行时间列在表的底部的运行时间所提出的方法几乎等于 MPCM 的方法。与 MinLocalLog 相比，LS_SVM、HBMLCM 和 MPCM，提出算法的运行时间更多，分别为 0.005 7、0.009 6、0.003 1 和 0.000 6 s，但仍处于同一数量级。Top-Hat 跑得最短时间，比所提出的算法低约 3 倍。RLCM 拥有最大的计算量，超过大多数方法 2 个数量级。

3 结束语

提出方法的创新体现在以下两个方面：利用真实红外图像建立自己的数据库，将深度学习技术应用于红外弱小目标检测；提出设置了两个阈值来引导粗粒和细粒探测器。该检测器缓解了了在目标检测任务中设置单一阈值的高要求。



(a~e) 是 5 个不同序列的比较结果，其中每个序列有 200 帧；(f) 是序列 2 中的任何一帧图像，主要用于具体解释提出方法 AUC 值低的原因。

图 4 不同算法的 ROC 曲线与相应 AUC 值的相关性

3 个实验验证了所提方法的鲁棒性、有效性和适用性,并验证了红外图像传感器参数的正确性。克服远程检测的挑战。其次,仿真表明该方法具有较好的抗噪声检测、多目标检测和多种小目标检测能力。同时,与 6 种最先进的算法相比,提出方法通过 5 种不同序列的 ROC 曲线和运行时间显示出了完美的检测精度和可接受的时间消耗。在控制虚警率的同时,大大提高了红外弱小目标的检测概率,在光电系统的目标检测过程中具有较强的实用性。

参考文献:

- [1] 杨红娟,李 鉴,马 军,等. 快照的时间反转和逆时偏移法对含有固体分层介质中目标的超声检测 [J]. 声学学报, 2022, 47 (1): 95-104.
- [2] 郝王丽,韩 猛,李 游,等. 生猪检测模型及数据集构建方式研究 [J]. 物联网技术, 2022, 12 (1): 18-21, 26.
- [3] 姜德文,和晓军. 改进区域建议的遥感图像目标检测方法研究 [J]. 沈阳理工大学学报, 2022, 41 (1): 26-30, 44.
- [4] 魏同飞,侯 志,张金栋,等. 基于 ZYNQ 的 LFM CW 雷达动目标二维检测的实现 [J]. 微波学报, 2021, 37 (S1): 138-141.
- [5] MA D, DONG L, XU W. A method for infrared sea-sky condition judgment and search system: Robust target detection via PLS and CEDoG [J]. IEEE Access, 2020, 9: 1439-1453.
- [6] 宋俊辰,李跃华,张宗毅. 基于 LFM 的雷达多目标检测研究 [J]. 微波学报, 2021, 37 (S1): 130-133.
- [7] 蒙晓宇,朱 磊,张 博,等. 基于结构相似性粗定位与背景差分细分割的运动目标检测方法 [J]. 科学技术与工程, 2021, 21 (36): 15563-15570.
- [8] WANG H, LI H, ZHOU H, et al. Low-altitude infrared small target detection based on fully convolutional regression network and graph matching [J]. Infrared Physics & Technology, 2021, 115: 103738.
- [9] 韩伶俐. 基于运动目标识别的摩托车视频监控驾考识别技术研究 [J]. 湖南工程学院学报 (自然科学版), 2021, 31 (4): 50-54.
- [10] ZHANG M, DONG L, MA D, et al. Infrared target detection in marine images with heavy waves via local patch similarity [J]. Infrared Physics & Technology, 2022, 125: 104283.
- [11] 胡 杰,刘 汉,徐文才,等. 基于三维激光雷达的道路障碍物目标位姿检测算法 [J]. 中国激光, 2021, 48 (24): 164-174.
- [12] 王战涛,张 策,王晓田. 基于 YOLOV3 的改进目标检测识别算法 [J]. 上海航天 (中英文), 2021, 38 (6): 60-70.
- [13] 李晨瑄,胥辉旗,钱 坤,等. 基于深度学习的舰船目标检测技术综述 [J]. 兵器装备工程学报, 2021, 42 (12): 57-63.
- [14] 石潇竹,杜洋帆,李晓辉,等. 低空小目标检测中的单通道干扰信号重构和抑制算法 [J]. 北京邮电大学学报, 2020, 43 (5): 143-148.
- [15] 张 磊,张永生,于 英,等. 遥感图像目标检测的数据增广研究 [J]. 测绘科学技术学报, 2019, 36 (5): 505-510.
- [16] 王 宁,孟晋丽,刘国庆,等. 机载雷达微弱目标帧间非相参积累与检测技术 [J]. 信号处理, 2021, 37 (2): 248-257.
- [17] 邢关生,许 甫. YOLO-mini: 可在 CPU 实时运行的目标检测网络 [J]. 电子测量技术, 2019, 42 (24): 148-151.
- [18] 魏利胜,丁 坤,段志达. 基于高斯加权均值分割的轴承工件检测和定位研究 [J]. 电子测量与仪器学报, 2019, 33 (10): 118-127.
- [19] 盛大俊,张 强. 基于边缘感知的深度神经网络红外装甲目标检测 [J]. 红外技术, 2021, 43 (8): 784-791.
- [20] 黎 炎,李 哲,陈 扬,等. 训练样本不足时雷达扩展目标检测方法 [J]. 南京理工大学学报, 2018, 42 (6): 727-731.
- [21] 胡靖逸,郭雪亮,李会军,等. 目标检测算法 R-CNN 在现实场景数字检测任务中的应用 [J]. 电子技术与软件工程, 2018 (24): 90.
- [22] 黄俊洁,陈念年,范 勇. 基于全局和局部卷积特征融合的车辆目标检测 [J]. 西南科技大学学报, 2018, 33 (4): 76-82.
- [23] 郑 浦,白宏阳,李政茂,等. 抖动干扰下运动目标精准检测与跟踪算法设计 [J]. 仪器仪表学报, 2019, 40 (11): 90-98.
- [24] ZHANG M, ZHANG R, YANG Y, et al. ISNet: Shape Matters for Infrared Small Target Detection [C] // Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. 2022: 877-886.
- [25] MA J, TANG L, XU M, et al. STDFusionNet: An infrared and visible image fusion network based on salient target detection [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2021, 70: 1-13.
- [26] ZHANG L, PENG Z. Infrared small target detection based on partial sum of the tensor nuclear norm [J]. Remote Sensing, 2019, 11 (4): 382.
- [27] ZHANG K, YANG K, LI S, et al. A difference-based local contrast method for infrared small target detection under complex background [J]. IEEE Access, 2019, 7: 105503-105513.
- [28] SUN Y, YANG J, LONG Y, et al. Infrared patch-tensor model with weighted tensor nuclear norm for small target detection in a single frame [J]. IEEE Access, 2018, 6: 76140-76152.
- [29] MORADI S, MOALLEM P, SABAHI M F. A false-alarm aware methodology to develop robust and efficient multi-scale infrared small target detection algorithm [J]. Infrared Physics & Technology, 2018, 89: 387-397.
- [30] MORADI S, MOALLEM P, SABAHI M F. A false-alarm aware methodology to develop robust and efficient multi-scale infrared small target detection algorithm [J]. Infrared Physics & Technology, 2018, 89: 387-397.
- [31] DAI Y, WU Y, ZHOU F, et al. Attentional local contrast networks for infrared small target detection [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2021, 59 (11): 9813-9824.