

# 基于局部显著度的机动弱小目标检测算法

王霞成<sup>1</sup>, 唐述<sup>2</sup>

(1. 昆山登云科技职业学院 工学院, 江苏 苏州 215300;

2. 重庆邮电大学 计算机科学与技术学院, 重庆 400065)

**摘要:** 由于待检测的红外远距离目标具有尺寸小、辐射低、背景复杂等检测难点, 以高检测率、低虚警率、高实时性进行红外弱小目标检测一直是一个具有挑战性的课题; 文章提出一种基于局部显著性的变速运动目标累积检测算法, 利用辐射能量积累方法提高目标在背景中的信噪比; 首先, 建立矢量空间及一阶导数空间, 对序列图像的每帧进行基于块显著度的局部对比度增强处理, 增强目标辐射能量并抑制背景, 同时显著减少了计算量; 然后, 进行变速运动空间及导数矢量空间的辐射能量叠加, 在空间矢量及导数矢量空间中检测序列图像中的目标在矢量空间及导数矢量空间运动特征的存在概率; 最后, 通过恒虚警检测得到目标的位置向量、速度、加速度向量, 完成目标检测; 实验结果验证了提出方法的有效性, 其检测率及虚警率均优于其他方法, 其中信杂比增益提高了 22.30, 背景抑制因子提高了 3 775.68, 处理时间开销降低了 0.65 秒。

**关键词:** 红外弱小目标检测; 变速运动目标; 基于块显著度的局部对比检测; 空间辐射能量累积

## Maneuvering Dim Small Target Detection Algorithm Based on Local Saliency

WANG Xiacheng<sup>1</sup>, TANG Shu<sup>2</sup>

(1. School of Engineering, Kunshan Dengyun College of Science and Technology, Suzhou 215300, China;

2. College of Computer Science and Technology, Chongqing University of Posts and Telecommunications, Chongqing 400065, China)

**Abstract:** Because the infrared long-range target to be detected has detection difficulties such as small size, low radiation and complex background, infrared small target detection with high detection rate, low false alarm rate and high real-time performance has always been a challenging subject. In this paper, a variable speed moving target cumulative detection algorithm based on local saliency is proposed, which uses the radiant energy accumulation method to improve the signal-to-noise ratio of the target in the background. Firstly, the vector space and first derivative space are established to enhance the local contrast of each frame of the sequence image based on block saliency, enhance the target radiation energy and suppress the background, and significantly reduce the amount of calculation. Then, the radiation energy of variable speed motion space and derivative vector space is superimposed, and the existence probability of the motion features of the target in the sequence image in the vector space and derivative vector space is detected in the space vector and derivative vector space. Finally, through CFAR detection, the position vector, velocity and acceleration vector of the target are obtained to complete the target detection. The experimental results verify the effectiveness of the proposed method, and its detection rate and false alarm rate are better than other methods. The signal to clutter ratio gain is increased by 22.30, the background suppression factor is increased by 3 775.68, and the processing time overhead is reduced by 0.65 seconds.

**Keywords:** infrared small target detection; variable speed motion target; local contrast detection based on block saliency; space radiation energy accumulation

## 0 引言

红外弱小目标检测是精确制导、红外搜索跟踪、红外监视等系统中常用的关键技术, 如何获得良好的检测性能一直都是充满挑战性<sup>[1-2]</sup>。主要原因为, 由于目标与探测器之间的距离很远<sup>[3]</sup>, 采集的图像中目标尺寸通常很小, 无法利用形状或纹理信息; 同时, 由于远距离大气吸收, 目标亮度很弱, 目标检测非常困难, 检测率很低; 还由于海面杂波、云等复杂背景的存在, 原始红外图像中存在多种类型干扰, 真实目标容易湮灭在大量虚假目标中<sup>[4]</sup>, 导致

检测的高虚警率; 随着红外焦平面阵列靶面增大, 输出的红外图像大小逐渐增加, 计算量越来越大<sup>[5]</sup>。

近些年来, 提出了很多新颖的红外弱小目标检测算法, 其中基于当下最热门的机器学习领域算法的弱小目标检测也引起很多学者注意, 包括有监督类型和无监督类型<sup>[6]</sup>, 但它们依赖于先验知识, 而且对于复杂背景下红外弱小目标检测效果仍不理想<sup>[7]</sup>。

红外弱小目标检测方法可分为两类: 跟踪前检测和检测前跟踪。

收稿日期: 2023-04-10; 修回日期: 2023-05-17。

基金项目: 国家自然科学基金项目(61601070)。

作者简介: 王霞成(1982-), 男, 硕士, 讲师。

唐述(1981-), 男, 博士, 副教授。

引用格式: 王霞成, 唐述. 基于局部显著度的机动弱小目标检测算法[J]. 计算机测量与控制, 2023, 31(10): 28-32.

传统的跟踪前检测算法对单帧图像进行滤波, 如高通滤波和形态学算子。这些算法或者利用小目标的特性直接检测目标, 或者估计杂波背景进行目标增强<sup>[8]</sup>。近年来, 大量学者在该领域进行了广泛的研究, 通常这些检测算法都从空间上检测目标, 这些算法适用于目标在局部背景中形态相对明显的应用场合。然而, 当图像中存在大量噪声干扰时, 性能并不理想。

近年来, 基于生物视觉机制的研究成果给红外弱小目标检测领域提供新思路。研究发现, 对人类视觉系统影响最明显的部分是对比度而非亮度, 该研究成果被称为人类视觉系统对比机制<sup>[9]</sup>。有助于快速锁定红外弱小目标在整图中的位置, 因为即使目标不是全图中辐射最强的部分, 仍然比领域背景亮度高, 并且在大多数情况下局部对比度更强, 在实际应用中常见目标通常比周围环境温度更高。因此, 与传统算法相比, 基于局部对比度的算法一般能获得更好的检测性能。并且算法简单、易实现。

总体而言, 提取局部对比度的差异可有效消除高亮背景, 但对真实目标的增强效果有限<sup>[10]</sup>; 而提取局部对比度比值可增强真实目标, 但很难有效地消除高亮背景<sup>[11]</sup>。很多学者提出将两者分为两个阶段结合起来的算法, 试图解决上述问题<sup>[12]</sup>。但可能带来更复杂的算法结构, 算法的鲁棒性欠佳。

与跟踪前检测方法不同, 检测前跟踪算法不针对每帧图像检测目标。而对多帧联合处理, 然后进行检测决策。代表性的检测前跟踪方法有霍夫变换、时间假设检验和三维匹配滤波等。

其中, 时间假设检验可理解为分类器<sup>[13]</sup>。目标运动在图像中的像素时间分布与杂波的像素时间分布不同, 然而, 该算法忽略了图像的空间信息, 导致检测性能下降<sup>[14]</sup>。在时间假设检验中, 大量的候选轨迹按树状结构排列。当累积的能量总和大于设定阈值时, 疑似轨迹为目标轨迹的假设将被接受。当信噪比较低时, 随着轨迹数目增加, 计算量会出现几何上升问题<sup>[15]</sup>。基于霍夫变换的方法首先将弱小目标轨迹在图像平面上的投影, 然后在二维数据空间中寻找运动目标。但投影会导致信噪比损失, 且在强噪声环境下, 算法性能严重退化。三维匹配滤波被应用于运动目标检测, 假设运动目标的速度已知且不变<sup>[16]</sup>。然而, 算法的性能受到速度失配和目标机动的影响。

1) 针对复杂背景下的红外弱小目标检测问题, 提出了一种基于分块显著度的局部对比检测 (local contrast detection based on block saliency, 简称 LCD-BBS 算法)。首先, 将全图分为多子块, 各子块都为小区域, 对子块进行图像处理, 由于子块数目远小于像素数目, 可极大减少计算量。然后, 针对各子块计算 BBS 指标, 获取更简单的算法结构。在计算结果中, 包含真实小目标的子块指标最显著, 干扰都得到很好抑制, 处理结果进入缓存。

2) 提取缓存区的多帧连续图像, 并基于定加速度模型在序列图像中检测弱小目标, 在位移及速度空间中检测序

列图像中的运动红外弱小目标。之后, 通过恒虚警检测获得目标位置、速度和加速度向量。

## 1 生物视觉注意力机制及卷积神经网络算法

在检测弱小目标时, 需获取更多的细节。尺度空间理论需在图像中引入尺度参数以建立模型。通过调整参数, 可获取更多的图像信息。

高斯卷积函数为尺度变换的核函数, Dog 滤波器定义如下:

$$\text{Dog}(x, y, \sigma) = G(x, y, k\sigma) - G(x, y, \sigma) \quad (1)$$

其中:  $G$  为尺度可变的高斯函数,  $(x, y)$  为空间坐标,  $\sigma$  为标准差。大尺度的处理算法可以表示图像一般特征, 小尺度的处理算法可表示图像细节。

当高斯滤波器中心与目标中心重合时, 响应达到峰值。根据该特征, 它可检测目标位置。在实际操作中, 通过两个不同尺度的高斯滤波器处理后的两幅图像, 获得 Dog 滤波器结果图像。选择具有局部最大响应的点作为候选目标。通过该过程, 大部分目标均能被有效检测出。

为抑制虚假目标, 设计小型卷积神经网络 (CNN, convolutional neural networks) 分类器对候选区域进行筛选, 确定其是否包含真实目标, 如图 1 所示。分类网络模型包括图像预处理层、特征提取模块、全局平均池层和软性结构层组成。在收集了大量红外图像后, 在送图像进入卷积层之前, 进行预处理, 调整图像对比度和亮度在合适的范围内。进行特征提取时, 使用两个卷积层组成的堆栈, 堆栈具备有效内核。使用两个八通道卷积层进行特征提取。每次下采样进行完毕后, 特征图通道数量增加了几倍。池层的内核大小与步长为两个参数, 特征提取模块输出为图像块及四通道的特征映射。

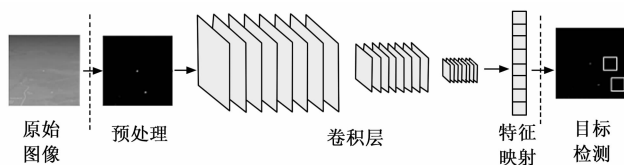


图 1 卷积神经网络示意图

在提取特征后, 使用全局平均池。优势是: 完全连接层具备大量训练参数。但在全局平均池中, 不需优化任何参数。另外, 全局平均池汇总出空间信息, 有利于提高干扰输入的鲁棒性, 全局平均池将每个特征映射对应于一个类别, 并输出每个特征映射的平均值作为相应。最后, 将所有数据相应输入下一层进行分类。当概率大于某阈值时, 识别其为潜在目标区域。

## 2 基于 Retinex 理论的检测算法

根据生物注意力机制及卷积神经网络的计算, 绝大部分目标都能被检测到, 但目标会被湮灭在复杂背景中。基于该认识, 对图像帧使用 MSR (multi-scale Retinex) 理论进行区域增强, 并分割目标。由于 Retinex 理论从颜色恒定

性理论出发进行推导, 通过人类视觉恒定性的机理, 可对图像细节进行补偿和增强。在 Retinex 理论中, 有单尺度 SSR, 多尺度 MSR 及集成色彩恢复的 MSRCR 算法。深度学习方法中也成功应用提出的 Retinex 方法。

MSR 理论在不同尺度上都具备单尺度 Retinex 的优势。该理论由物体对不同波长光线的反射确定, 而非反射光决定。物体表面的彩色以一种一致性的方式出现, 即色感一致性。相比经典方法只能用于增强图像某特征方法, Retinex 算法能够维持动态压缩、增强边缘、色彩维持恒定。可对不同背景的图像进行针对性增强。

对图像进行 MSR 的步骤为:

1) 首先检测当前帧中的目标。如果没有目标且检测到的最后一帧中的目标不在图像的边界上。这意味着在此帧中, 目标的 SNR 可能太小而无法检测, 然后转到步骤 3)。如果此帧中存在目标, 请转至步骤 2) 并继续判断。

2) 遍历最后一帧中检测到的每个目标, 判断该帧中是否有目标靠近它。仅当最后一帧中的目标未出现在图像的边界处且附近没有目标时, 转至步骤 3)。

3) 利用 MSR 理论, 在最后一帧中增强目标周围的局部区域。该区域可以设置为目标大小的几倍; 在本文中, 区域设置为目标大小的五倍。

4) 在局部区域分割目标。

### 3 基于分块显著度的局部对比检测算法

以典型红外图像为例以分析真实弱小目标和其他干扰的区别, 在真实原始红外图像中包含单个真实弱小目标, 弱目标尺寸非常小, 且无结构及纹理信息。但探测器成像时会发生光学点扩展, 真实弱小目标成像面积仍会大于 1 像素  $\times$  1 像素, 并大致均匀分布。另外, 在多数情况下, 目标通常比其周围环境温度更高, 于是它会比图像中邻近环境更亮, 且在局部区域对比度较低。背景通常平坦均匀, 灰度值较低, 局部对比度低。高亮背景通常面积较大, 内部灰度值连续, 因此局部对比度不明显, 尽管其灰度值可能远大于真实目标。背景边缘局部对比度信息较强, 但因灰度在两侧不连续, 且背景边缘通常沿特定方向分布, 与真实目标存在一定差异。随机噪声与真实目标最相似, 但随机噪声通常由随机因素引起, 在序列图像中出现无连续性特征, 与真实目标不同。

首先考虑真实目标占据区域很小, 认为无需逐像素计算局部对比度信息, 将全图划分为多个子块代替, 计算工作在子块级进行, 于是计算量被大幅减少。然后针对各子块, 提出了基于分块显著度的局部对比检测算法 (LCD-BBS)。提出的算法可同时增强目标并抑制背景杂波干扰, 包含真实红外弱小目标的子块指标最高。

传统基于局部对比度算法基本都在像素级进行, 计算量相当大。为减少计算量, 提高实时性, 在计算局部对比度前, 先将全图分为多子块, 各子块都为单个小区域, 基于字块而非像素进行局部对比度计算。

为有效及合理划分字块, 需设置合理的窗口大小及移动步长, 若窗口太大, 子块数量少, 且计算量小, 但检测的子块中可能除目标外, 包含太多的背景信息, 检测性能不够; 若窗口太小, 子块数量多, 计算量大, 但检测的子块中目标突出, 检测性能好。文章按目标先验大小  $3 \times 3$  像素, 设定窗口大小为  $9 \times 9$  像素, 步长为 4 像素, 取得检测性能及实时性的平衡。

由于弱小目标在局部区域显著, 在全图中不显著, 因此重点关注局部图像块, 该图像块由 9 领域子块组成, 使用中心子块与周边子块的比值差联合局部对比度检测弱小目标。

$$BBS = \max_k \{G_c - G_k\} \quad (2)$$

如果  $BBS < 0$ , 令  $BBS = 0$ 。

其中:  $G_c$  为中心图像块的平均显著度灰度值,  $G_k$  为周边图像块的平均显著度灰度值, 求解方式为子块像素排序, 灰度值最大的前  $n$  个像素的灰度值平均。

因为干扰噪声一般以单像素形式出现。由于真实弱小目标通常比其邻近区域更亮, 因此使用非负约束来抑制杂波。

然后, 考虑到背景边缘通常在一个小的局部区域内沿着一个特定的方向分布, 而真正的小目标通常在各个方向上大致均匀地分布<sup>[17]</sup>, 算法中使用各个方向最小值作为 BBS 的最终指标<sup>[18]</sup>。

然而, 真实弱小目标与其邻近目标之间的灰度差可能不够显著, 尤其是当目标较暗时。因此, 需增强真实目标。文章考虑到真实弱小目标通常是局部区域内最亮的目标, 采用中心子块比值作为增强因子以增强真实目标。最终在各个方向定义 BBS 最小值。为同时实现增强真实目标及抑制高亮度背景, 将局部对比度比值和差值求乘。经过 LCD-BBS 计算后, 真实目标获得增强, 各种干扰得到抑制。

### 4 基于定加速运动模型的多帧图像处理算法

鉴于红外图像的像素噪声也是独立的。其次, 在研究红外噪声特性时, 短期和局部窗口的噪声可以近似地看作是时空平稳的高斯噪声。这两点说明红外图像中的噪声是独立的、同分布的, 并且服从高斯分布。红外噪声特性是辐射积累的理论基础。它们确保辐射累积增加有效目标能量, 同时降低接收到的噪声。

弱小目标被探测器捕获, 在探测器上的运动形式为在序列图像的连续帧中沿一定运动轨迹方式连续出现。处理图像时, 为保证不漏检, 需检测各个空间位置目标的位置。

然后, 定义二位位置空间  $P_T$ 。对于匀速直线运动弱小目标, 定义速度及位置矢量可确定其精确的运动轨迹。信噪比通过沿目标运动轨迹累积能量来提高。在没有先验信息的条件下, 遍历速度及位置域可无漏检地实现目标检测。

为实现定加速运动下目标检测, 创建速度向量空间:

$$V = \{v | v = (v_x, v_y)\} \quad (3)$$

其中:  $v_x, v_y$  均为沿  $x$  轴和  $y$  轴的速度大小。

创建加速度向量空间:

$$A = \{a | a = (a_x, a_y)\} \quad (4)$$

其中:  $a_x, a_y$  均为沿  $x$  轴和  $y$  轴的加速度大小。

假设待检测的图像序列按序列帧顺序排列, 将图像序列定义在原始图像序列空间  $K$  中:

$$K = \{I | I = I(\mathbf{p}, k)\} \quad (5)$$

其中:  $k$  是图像序列序号,  $\mathbf{p}$  为目标位置向量,  $I$  为图像函数。

在定加速度空间中的能量累积过程函数如下:

$$I(\mathbf{p}) = \sum_k I(\mathbf{p} - \mathbf{v}t - \mathbf{a}t^2/2, k) \quad (6)$$

其中:  $k$  为能量累积的帧数, 表示当积累目标的能量时, 应沿目标运动反方向将其他帧叠加在参考帧上。因此, 当输入准确的速度及加速度信息后, 可获得信噪比提高的结果图像, 即使用图像叠加的手段提升目标的信噪比。

## 5 算法流程

如图 2 所示, 文章提出的处理算法步骤如下:

1) 对序列图像每帧进行基于块显著度的局部对比检测处理, 同时增强目标辐射能量并抑制背景, 且能够显著减少计算量。

2) 创建位置及速度空间, 对序列图像进行变速运动空间辐射能量累积, 在位置及速度空间中检测序列图像中的目标。

恒虚警检测得到疑似目标的位置向量及速度、加速度向量。

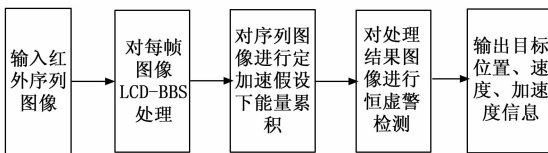


图 2 算法流程图

## 6 实验

实验中使用的红外探测器参数为: 中波红外探测器、视场角  $5^\circ \times 4.8^\circ$ , 焦距 103 mm, 像元尺寸  $22 \mu\text{m} \times 22 \mu\text{m}$ , 阵列大小  $520 \times 480$ , 帧频 30 Hz。

为说明该算法有效性, 比较了该算法与其他现有算法的检测性能。这里选择了几种先进算法, 包括 Max-Mean、Max-Median、TDLMS、LCD 和提出的 LCD-BBS 算法。利用 SCR 增益 (SCRG) 和背景抑制因子 (BSF) 来测试目标增强和复杂背景抑制能力。

$$SCRG = SCR_{out}/SCR_{in}$$

$$BSF = \sigma_{in}/\sigma_{out}$$

其中:  $SCR_{out}$  为算法输出图像的目标信杂比,  $SCR_{in}$  为算法输入图像的目标信杂比。  $\sigma_{out}$  为算法输出图像的局部噪声标准差。  $\sigma_{in}$  为算法输入图像的局部噪声标准差。

选取五组序列图像, 挑选典型图进行指标计算, 结果如表 1~3 所示。由表中数据可见, 提出的 LCD-BBS 算法在 SCRG 和 BSF 指标方面都超出传统算法及近些年提出的新算法, 目标检测效果十分显著。

由表中数据可知, 新提出算法的 SCRG 指标可达

32.56, BSF 即背景抑制因子可达 3 874.58, 证明提出算法在信噪比提升能力方面及背景抑制方面的优良效果。与传统的 Max-Mean 及 Max-Median 算法相比, 在序列图像中表现均一般。而 TDLMS 算法效果强于 Max-Mean 及 Max-Median 算法, 尤其背景抑制效果, 要高出很多。对于 LCD 算法而言, 虽然比经典 3 种算法 Max-Mean、Max-Median 及 TDLMS 都要高一些, 但总体而言, 表现不如 LCD-BBS 算法, 即进行本文提出算法的改进后, LCD 算法效果得到了极大提升, 对于检测目标及背景上的抑制, 均得到了很多优化。

表 1 SCRGR 指标对比

	Max-Mean	Max-Median	TDLMS	LCD	LCD-BBS
序列 1	1.85	13.29	12.58	13.53	42.94
序列 2	4.51	1.20	12.43	10.16	37.79
序列 3	9.20	17.06	8.92	11.38	22.68
序列 4	8.03	18.71	11.55	10.23	48.01
序列 5	9.62	13.74	6.71	10.49	11.38
平均值	10.26				32.56

表 2 BSF 指标对比

	Max-Mean	Max-Median	TDLMS	LCD	LCD-BBS
序列 1	2.31	3.97	127.60	249.84	4 607.10
序列 2	2.03	3.62	167.97	295.97	1 828.53
序列 3	3.87	5.21	165.51	234.04	3 233.36
序列 4	4.02	5.70	116.26	258.53	4 314.83
序列 5	1.10	6.06	106.90	217.38	5 389.06
平均值	98.89				3 874.58

表 3 单帧耗时对比

	Max-Mean	Max-Median	TDLMS	LCD	LCD-BBS
序列 1	0.96	1.76	0.41	0.27	0.01
序列 2	0.59	0.88	0.28	0.37	0.02
序列 3	0.22	1.72	0.33	0.32	0.02
序列 4	0.23	0.87	0.65	0.31	0.01
序列 5	0.33	1.89	0.53	0.38	0.02
平均值	0.67				0.02

可知, 提出的 LCD-BBS 算法的耗时最短, 在 10~20 ms 范围, 其它算法比提出算法的耗时至少高一个数量级。

为验证提出算法在序列图像中的处理能力, 在序列图像 1 中进行测试, 如图 3 所示, 用  $\times$  表示真实目标轨迹, 用  $\circ$  表示提出算法的检测轨迹。可见, 检测准确率很高, 检测轨迹点距离真实轨迹点很近。绘制误差曲线如图 4 所示, 易知, 检测轨迹位置误差大部分都在 2 像素以内。

为了进一步验证提出算法的优势, 对 6 个序列红外图像绘制 ROC 曲线, 如图 5 所示。以虚警率  $P_f$  为横坐标, 以检测率  $P_d$  为纵坐标, 两个变量定义为:  $P_d$  表示检测到真实目标的帧数除以存在真实目标的总帧数,  $P_f$  表示检测到

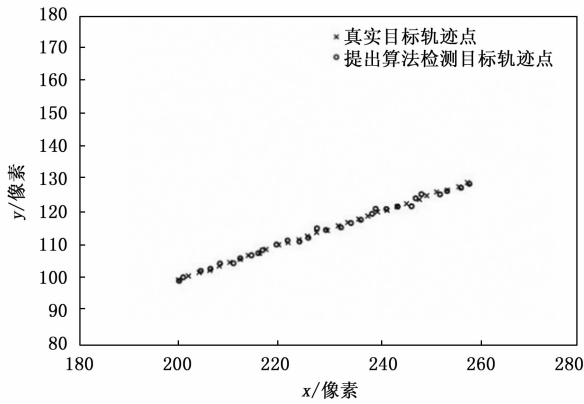


图 3 目标轨迹检测图

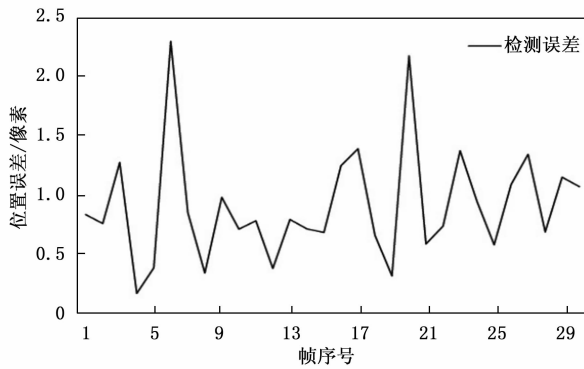


图 4 目标轨迹误差图

虚假目标的帧数除以检测到目标的总帧数。

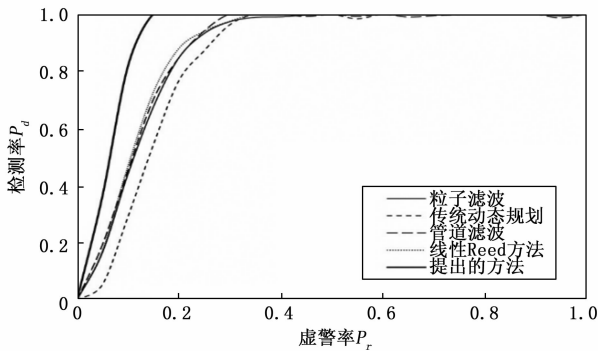


图 5 ROC 曲线

为了进一步揭示该算法的优点，将 ROC 曲线应用于所选的序列图像，即，对于每个算法，将其阈值设置为不同的值，并绘制 ROC 曲线关系。从图中可以看出，对于相同的虚警率，所提出的算法在大多数情况下都能达到最高的检测率。这一结果表明，与其他算法相比，该算法在不同信噪比背景下的性能更稳定。

## 7 结束语

文章提出一种基于分块显著度的局部对比检测变加速弱小目标算法。首先，对单帧图像进行处理以抑制背景、增强目标。处理方法是先将全图按字块划分，按分块显著度的局部对比检测指标计算。然后，按照定加速模型对序列图像的

弱小目标进行能量累积。最后，按照恒虚警检测算法获得目标的位置向量及速度、加速度向量。实验结果表明，提出的算法能够准确检测低信噪比图像中的弱小目标，并对目标运动状态预测。与其他算法相比，在相同的虚警率下，提出的算法检测率更高，且实时性、鲁棒性较强。

## 参考文献:

- [1] ZHANG H, LIU F, FAN Y, et al. FAFFENet: frequency attention and feature fusion enhancement network for multiscale remote sensing target detection [J]. Journal of Applied Remote Sensing, 2022, 16 (1): 14511-14512.
- [2] 胡春梅, 夏国芳, 张旭, 等. 文物对象近景序列影像位姿高精度估计方法 [J]. 测绘通报, 2022, 1: 50-55.
- [3] 杨德振, 喻松林, 冯进军, 等. 机载复杂场景下的低虚警红外目标检测 [J]. 光学精密工程, 2022, 30 (1): 96-107.
- [4] 董殿敏, 刘克, 刘祎冉. 基于机器视觉的影像式耐火度检测系统 [J]. 计算机测量与控制, 2022, 30 (1): 47-59.
- [5] 王征, 何云丰, 孙兴国, 等. 天问一号高分辨率相机图像存储及处理系统设计 [J]. 光学精密工程, 2022, 30 (2): 127-136.
- [6] 聂霖, 郑传广, 徐莹, 等. 基于机器视觉的燃烧碳化面积测量方法研究 [J]. 计算机测量与控制, 2021, 29 (4): 59-64.
- [7] 蔺素珍, 张海松, 禄晓飞, 等. RBNSM: 一种复杂背景下红外弱小目标检测新方法 [J]. 红外技术, 2022, 44 (7): 667-675.
- [8] 熊芝, 许航, 张刘港, 等. 基于加权加速正交迭代算法的相机位姿估计 [J]. 红外与激光工程, 2022, 51 (10): 173-181.
- [9] 王志武, 张子森, 许凯, 等. 基于最佳偏振角的线性位姿测量方法研究 [J]. 红外与激光工程, 2022, 51 (3): 329-338.
- [10] 蔡军, 邱会然, 谭静, 等. 多尺度上下文融合的交通标志识别算法研究 [J]. 无线电工程, 2022, 52 (1): 114-120.
- [11] 薛俊杰, 陈剑, 徐恒, 等. 复杂环境下基于序列 Hough 变换和逻辑法的航迹起始方法 [J]. 无线电工程, 2022, 52 (4): 624-629.
- [12] 张磊, 徐孝彬, 曹晨飞, 等. 基于动态特征剔除的图像与点云融合的机器人位姿估计方法 [J]. 中国激光, 2022, 49 (6): 126-137.
- [13] 杨利, 陈柳松, 谢永超. 基于机器视觉的芯片引脚缺陷检测系统设计与实现 [J]. 计算机测量与控制, 2021, 29 (7): 16-20.
- [14] FAN M, TIAN S, LIU K, et al. Infrared small target detection based on region proposal and CNN classifier [J]. Signal, Image and Video Processing, 2021, 182: 961-973.
- [15] JU M, LUO J, LIU G, et al. A real-time small target detection network [J]. Signal, Image and Video Processing, 2021, 15: 1265-1273.
- [16] 卢笑, 曹意宏, 周炫余, 等. 基于深度强化学习的两阶段显著性目标检测 [J]. 电子测量与仪器学报, 2021, 35 (6): 34-42.
- [17] 张耀文. 基于激光雷达的空间非合作目标位姿估计 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2021.
- [18] 刘芬, 程勇策, 郑尧, 等. 基于 SCNN 的红外弱小目标检测算法研究 [J]. 激光与红外, 2021, 51 (6): 820-824.