

doi:10.3788/gzxb20134207.0839

一种基于知识模型的红外目标检测方法

苏娟, 杨罗, 卢俊

(第二炮兵工程大学, 西安 710025)

摘 要:针对电厂冷却塔这类具有特殊建筑规范的典型目标,在分析目标红外特性与形状特性的基础上,提出了一种基于知识模型的红外目标检测方法.首先根据冷却塔目标的红外特性,提取图像的亮度、方向和局部熵特征,采用视觉注意模型提取红外图像中的显著区域,作为待检测目标的感兴趣区域;在此基础上,根据冷却塔目标的形状特性建立双曲线形状模型,在感兴趣区内进行结构特征边缘提取和形状模型拟合,构建相关判定准则检测出目标.在一组机载前视红外图像上的实验结果表明,该方法可以达到 98.67% 的查全率和 93.97% 的查准率,具有较好的目标检测效果.由于本文方法不需要基准图的参与,降低了对数据保障的要求,因此具有较大的实用性.

关键词:目标检测;视觉注意模型;显著区域;知识模型

中图分类号:TP391

文献标识码:A

文章编号:1004-4213(2013)07-0839-6

An Infrared Target Detection Algorithm Based on Knowledge Model

SU Juan, YANG Luo, LU Jun

(The Second Artillery Engineering University, Xi'an 710025, China)

Abstract: Based on analyzing the infrared characteristics and shape characteristics of condensing tower that has special construction rules, an infrared target detection algorithm based on knowledge model is proposed. Firstly, based on the infrared characteristics of condensing tower, the intensity, orientation and local entropy features are extracted to construct the visual attention model, which is used to extract salient regions as regions of interest in the infrared image. Secondly, based on the shape characteristics of condensing tower, hyperbola shape model is constructed for condensing tower, structure feature edges are extracted in the salient regions and used to fit the hyperbola shape model, and relevant decision rules are constructed to confirm the targets. The recall and precision of the experiment on a set of air-born infrared images can reach up to 98.67% and 93.67% respectively, which demonstrates the excellent performance of the proposed algorithm. Moreover, since the reference image is unnecessary in the proposed algorithm, the requirements for the data preparation is reduced greatly, which improve the practicality of the algorithm.

Key words: Target detection; Visual attention model; Salient region; Knowledge model

0 引言

在军事武器的火控系统和精确打击武器的末段制导过程中,通过对典型目标的检测与识别,可以为精确制导武器提供定位导航支持,从而有效地提高制导性能和命中准确度.由于红外传感器具有灵敏

度高、隐蔽性好、全天时工作等优点,红外末制导已成为目前研究的热点和发展的主流.因此,红外图像中的目标检测近年来得到了广泛关注和深入研究.红外图像根据目标与背景的温差成像.实际情况下,受周围物体的热辐射、目标表面纹理、场景中其他地物的干扰等因素的影响,可能出现目标内部辐射不

基金项目:国家自然科学基金(Nos. 61072141, 61132008)资助

第一作者:苏娟(1973-),女,副教授,博士,主要研究方向为遥感图像处理与模式识别. Email: suj04@mails.tsinghua.edu.cn

收稿日期:2013-01-11;录用日期:2013-03-11

均匀、目标与背景界限不明显、目标形状发生变化等情况,使得在红外图像中进行目标检测非常具有挑战性。

目前,红外目标检测主要包括基于模板匹配和基于知识模型的方法。基于模板匹配的方法是制作基准模板并装订到飞行器上,通过计算实时图与模板的相似性测度,找出最佳匹配区域,实现目标的检测。但模板与实时图之间存在较大的差异,为模板匹配方法带来较大的不确定性。基于知识模型的方法是根据目标的先验知识,提取目标的可鉴别性特征,建立相应的知识模型,从而对场景中的目标进行检测。由于有知识规则的限定,该类方法的处理过程针对性强、效率高,并且降低了检测算法对数据保障的要求,因此对形状固定、特性明显的目标具有较好的适用性,但检测算法根据目标类型的不同而不同^[1]。目前该类算法在机场跑道、桥梁、雷达天线罩等典型目标的自动检测上得到了应用^[2-3]。上述目标在红外图像中的形状特征和场景特征与在其它类型的图像中基本一致,并且红外特征非常显著。

火力发电厂是现代战争中备受关注的典型目标,而冷却塔是其主要功能部件,摧毁冷却塔就可以使发电厂陷于瘫痪状态;并且,与发电厂其他建筑相比,冷却塔相对容易分辨。因此冷却塔成为对发电厂进行攻击时的首选打击目标。文献[4]针对冷却塔目标,提出了梯度矢量互相关的匹配测度,取得了较好的匹配效果,但该方法是基于模板匹配的,需要进行前期的基准图制备工作。冷却塔在根据温差成像的红外图像中表现为灰度比较均匀的高亮目标,塔身形状一般为双曲线。因此可以根据红外图像中冷却塔的典型红外特性和形状特性,构建相应的知识模型进行自动检测。

因此,本文针对电厂冷却塔这类典型目标,研究基于知识模型的自动目标检测算法。首先根据冷却塔的红外特性,采用改进的视觉注意模型提取显著区域;然后根据冷却塔的形状特性,采用相关判定准则从显著区域中检测出冷却塔。

1 本文算法

本文算法流程如图1,主要包括冷却塔知识模型的建立、基于目标红外特性的感兴趣区提取和基于目标形状特性的冷却塔检测三部分。

本文构建的冷却塔目标知识模型为:

1) 红外特性

冷却塔的主要功能是将挟带废热的冷却水在塔内与空气进行热交换,使废热从塔筒出口排入大气,

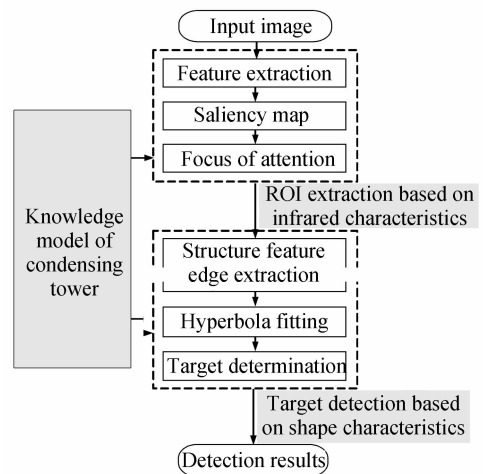


图1 本文算法流程

Fig.1 Overall flowchart of the proposed algorithm

冷却过的水由水泵再送回锅炉循环使用。因此,与背景相比,冷却塔内的温度较高,在根据温差成像的红外图像中表现为高亮目标;并且由于塔内温度差异不大,因此塔身内部灰度分布比较均匀,与其所处的背景的复杂多样的灰度分布形成强烈的对比,容易引起人眼视觉的注意。该特性有助于将冷却塔目标从复杂的地面和天空背景下分割出来。

2) 形状特性

通过对大量冷却塔目标图像判读可知,冷却塔外部轮廓呈现为双曲线的形状,如图2(a)。双曲线定义为到两定点(焦点)的距离之差为常量的动点M的轨迹,如图2(b)。塔身最小半径处称为喉部,以

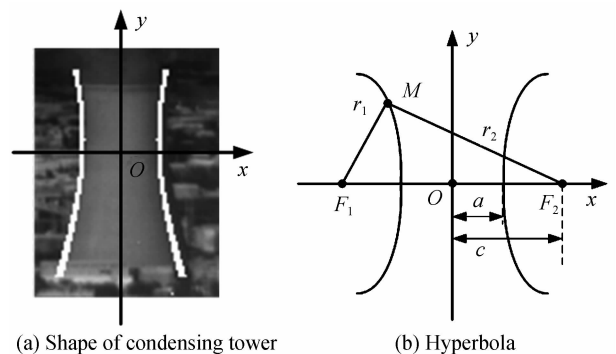


图2 冷却塔的形状模型

Fig.2 Shape model of condensing tower

喉部横向为 x 轴,以喉部中心纵向为 y 轴,建立直角坐标系,塔身双曲线的标准方程为

$$x^2/a^2 - y^2/b^2 = 1 \quad (1)$$

双曲线的基本元素包括:实轴长度 $2a$,两条曲线与 x 轴相交的两点之间的长度;离心率 e ;焦距 c ,焦点 $F_1(-c,0)$, $F_2(c,0)$ 到原点的距离, $c=e \cdot a$;曲线上的点到两个焦点的距离之差 dr , $dr=|r_1-r_2|$ 。

因此,本文算法在建立的冷却塔知识模型的引

导下,首先根据目标的红外特性,采用视觉注意模型提取图像中的显著区域,作为包含疑似目标的感兴趣区域,这一阶段为目标的粗定位;然后根据目标的形状特性,构建相关判决准则从疑似目标区域中检测真实目标,实现目标的精定位。

2 基于目标红外特性的显著区域提取

红外图像的成像特性决定了场景中典型人造目标与背景具有较大的差异性.通过检测图像中的视觉显著区域,为目标检测算法提供感兴趣区域,能够有效利用计算资源和提高检测效率.自1998年Itti等^[5]首次提出基于视觉注意机制的目标检测模型后,该模型受到国内外研究者的广泛关注^[6-8].但他们的工作都是基于可见光图像的,并没有涉及红外图像.在Itti模型的基础上,本文提出一种改进的基于视觉注意机制的红外目标显著区域提取算法,主要由特征提取、显著图生成、显著区域提取3个步骤组成。

2.1 特征提取

Itti模型所采取的特征包括图像的亮度、方向和颜色特征,但本文所处理的红外图像没有信息量丰富的颜色信息.因此,在特征提取阶段,除提取Itti模型中的亮度、方向特征外,本文在对红外图像中的典型目标进行红外特性分析的基础上,提取了图像的局部熵特征。

局部熵反映了图像能量在空间分布的统计特征,局部熵越大,像素灰度分布的无序程度就越高,信息量越多;局部熵越小,其像素灰度分布的有序程度就越高,信息量就越少.局部熵定义为^[9]

$$H_{D,R_X} = -\sum_i P_{D,R_X}(d_i) \log_2 P_{D,R_X}(d_i) \quad (2)$$

式中, $P_{D,R_X}(d_i)$ 表示灰度值等于 d_i 的像素数与 R_X 局部区域总像素数之比, $d_i \in [0,255]$, $D = \{d_1, d_2, \dots, d_r\}$.图3(a)为原始图像;图3(b)为对应的局部熵图像.由于冷却塔目标内部灰度分布比较均匀,因此具有较小的局部熵,与其所处的复杂背景区域形成了强烈的对比。

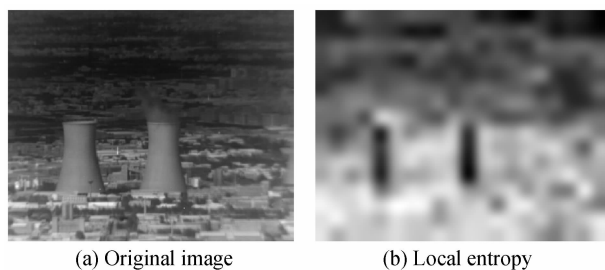


图3 局部熵效果图

Fig. 3 Illustration of local entropy

2.2 显著图生成

分别构造亮度、方向、局部熵特征的高斯金字塔,通过对逐层进行低通滤波处理和降采样,使每个通道产生9个尺度的金字塔.然后利用中央-周边差异来计算各通道的特征图,这种方法与人类视觉细胞类似,具有对感受中央信息敏感,对感受周边信息抑制的响应特性.金字塔底层的图像分辨率高,上层的分辨率低,将每个像素看作是对应原图中的一个区域,因此中央与周围区域的差异就可以通过金字塔不同层的差来计算,计算时采用如式(3)的中央-周边算子。

$$X(c,s) = |X(c) \ominus X(s)| \quad (3)$$

式中: X 代表亮度、方向、局部熵特征, c 代表中央尺度, $c \in \{1,2,3\}$, s 代表周边尺度, $s = c + \delta$,这里 $\delta \in \{2,3\}$," \ominus "表示为两个不同尺度图像的差运算。

通过中央-周边差异,共获取36幅特征图:6幅亮度通道特征图 $I(c,s)$,24幅方向通道特征图 $O(c,s,\theta)$ 和6幅局部熵通道特征图 $E(c,s)$.然后,对各特征通道的差异图进行归一化处理,以去除各个通道的不同动态范围.再通过跨尺度融合将各尺度的图像融合得到亮度、方向、局部熵的特征图 $\bar{I}, \bar{O}, \bar{E}$

$$\begin{aligned} \bar{I} &= \bigoplus_{c=2}^4 \bigoplus_{s=c+3}^4 N(I(c,s)) \\ \bar{O} &= \sum_{\theta \in \{0^\circ, 45^\circ, 90^\circ, 135^\circ\}} N\left(\bigoplus_{c=2}^4 \bigoplus_{s=c+3}^4 N(O(c,s,\theta))\right) \\ \bar{E} &= \bigoplus_{c=2}^4 \bigoplus_{s=c+3}^4 N(E(c,s)) \end{aligned} \quad (4)$$

式中 $N(\cdot)$ 表示归一化函数, \oplus 表示跨尺度组合。

将特征图 $\bar{I}, \bar{O}, \bar{E}$ 进行如式(5)的线性融合,则可生成显著图。

$$S = (\bar{I} + \bar{O} + \bar{E}) / 3 \quad (5)$$

2.3 显著区域提取

首先,根据赢者全胜原则从显著图 S 中选择显著值最大的区域作为当前的注意焦点(Focus of Attention, FOA).不同于Itti模型直接以该注意焦点为圆心,原图像宽度与高度两者最小值的1/6为半径的圆来确定显著区域,本文采用熵的最大化方法来确定显著区域的尺寸^[10],对于每一个显著区域的中心 x (即每一个FOA),其最优的尺寸 x_s 由式(6)获得,即

$$x_s = \underset{s}{\operatorname{argmax}} \{H_D(s,x) \times W_D(s,x)\} \quad (6)$$

式中 D 表示显著图中以 x 为圆心, s 为半径的圆形局部区域所有像素值的集合, $H_D(s,x)$ 和 $W_D(s,x)$ 分别为该区域的熵值和尺寸,由式(7)和(8)确定。

$$H_D(s,x) = -\sum_{d \in D} P_{d,s,x} \log_2 P_{d,s,x} \quad (7)$$

$$W_D(s, x) = \frac{s^2}{2s-1} \sum_{d \in D} |P_{d,s,x} - P_{d,s-1,x}| \quad (8)$$

式中 d 表示集合 D 中的一个元素, $P_{d,s,x}$ 表示在通过以 x 为圆心, s 为半径的圆形局部区域内标准化像素的直方图得到的概率块函数.

然后通过抑制返回机制, 将显著图中上一个显著区域赋值为最小, 再采用上述方法实现 FOA 的转移和选取下一个显著区域, 直到显著图中不再有显著区域. 通常人为附加 FOA 的转移停止条件, 例如显著性阈值下限或 FOA 数目上限(本文设定 FOA 数目上限为 5)等.

图 4 给出了显著区域提取的示意图. 图 5 显示了本文改进模型和 Itti 模型在同一幅红外图像上提取的显著区域比较, 第一行为显著图, 第二行为提取的显著区域. 图 5(b) 为 Itti 模型提取的结果, 图 5(c) 为改进模型提取的结果, 可以看出改进模型提取的显著区域更加符合人类视觉的注意区域.

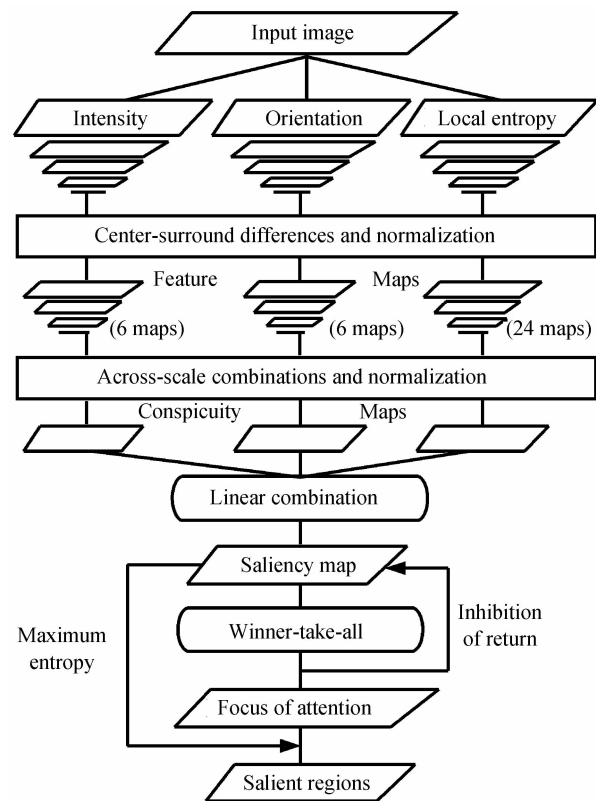


图 4 显著区域提取算法流程

Fig. 4 Flowchart of salient region extraction algorithm

由于局部熵特征是区域信息复杂程度的体现, 冷却塔目标区域的灰度值分布比较均匀, 与周边区域相比, 其熵值偏低, 在进行中央-周边差异后能够突出目标区域, 因此局部熵特征与亮度和方向特征相结合, 能够很好地反映目标区域的信息, 从而得到很好的显著区域提取效果.

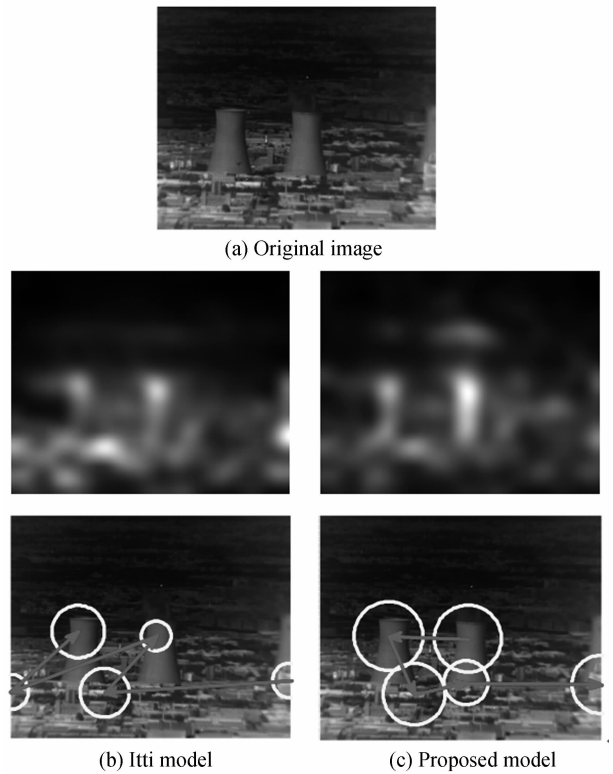


图 5 显著区域提取

Fig. 5 Salient region extraction

3 基于目标形状特性的冷却塔检测

根据冷却塔目标的红外特性, 采用改进的视觉注意模型可以提取出红外图像中的显著区域, 即感兴趣区域, 显著区域数目取决于预设的 FOA 的个数. 为了从多个感兴趣区内确定冷却塔目标所在的感兴趣区, 并检测出冷却塔目标, 需要在上述感兴趣区内, 根据冷却塔目标的形状特性进行冷却塔的检测, 实现目标红外特性与形状特性的结合. 因此本节在此基础上, 提出基于目标形状特性的冷却塔检测算法, 主要包括结构特征边缘提取、双曲线拟合与目标判定 3 个步骤.

3.1 结构特征边缘提取

结构特征边缘可以反映出目标的组织结构模式, 具有比较稳定的曲率. 本文在采用视觉注意模型提取得到的显著区域中进行结构特征边缘提取, 尽可能去除杂乱散碎边缘, 为后续处理减少干扰和噪声. 步骤:

- 1) 提取图像的 Canny 边缘图; 2) 采用基于局部处理的边缘点连接方法从 Canny 边缘图中提取边缘线段; 3) 计算边缘线段上每个边缘点的曲率 k_i ; 4) 计算每条线段边缘点曲率的均值 \bar{k} , 若线段上满足 $|k_i - \bar{k}| < th$ (th 为预设阈值) 的点占边缘点

总数的 2/3,则认为该线段具有比较稳定的曲率并保留该边缘线段,否则予以剔除;5) 将保留的边缘线段作为目标的结构特征边缘. 并对其进行直线拟合,记录拟合的斜率与截距.

以图 5(c)中第 2 个焦点为中心的显著区域内提取结构特征边缘,结果如图 6. 图 6 其中(a)为显著区域对应的原图,图 6(c)为结构特征边缘图.

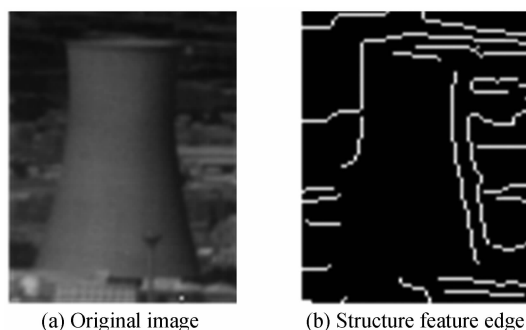


图 6 结构特征边缘提取

Fig. 6 Structure feature edge extraction

3.2 双曲线拟合

令 D 表示显著区域的结构特征边缘图,在 D 中建立一个坐标系,寻找满足双曲线定义的边缘点,步骤为:

1) 建立坐标系

在图像中,以显著区域的 FOA 所在的纵轴为轴,将区域 D 分为左右两个子图 A 和 B ,假设 A 中的每一点与 B 中的所有点为一个纵向对称的点,然后计算所有点对的对称坐标,统计这些坐标值,找到统计次数最多的坐标值 x_0 .

找出区域 D 中具有最长垂直边缘的线段,计算该线段起止 y 坐标的均值 y_0 . 将图像中 (x_0, y_0) 处确定为直角坐标系的原点位置,建立坐标系,如图 7 (a),其中 O 为原点.

根据建立的坐标系,将各边缘点在原图的坐标映射为新的坐标.

2) 确定双曲线的基本元素

a ——计算原点 O 到最近垂直边缘的距离,该距离即为 a ;

e ——本文根据经验选取为 3;

c ——依据 $c = e * a$ 计算得到,同时也确定了两个焦点的坐标分别为 $F_1(-c, 0)$ 和 $F_2(c, 0)$.

dr ——首先计算每一个边缘点到两焦点的距离差,然后进行统计,将统计次数最多的值作为 dr .

3) 双曲线拟合

根据双曲线的定义,将区域 D 中满足到焦点 $F_1(-c, 0)$ 和 $F_2(c, 0)$ 的距离差在 $dr \pm \epsilon$ (ϵ 为设定的容差,本文设定为 2 个像素)范围内的点赋值为 255,由此拟合双曲线 L ,如图 7(b).

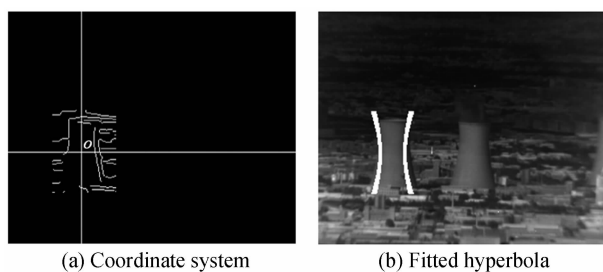


图 7 双曲线拟合结果

Fig. 7 Fitting result of hyperbola

3.3 目标判定

曲线 L 与区域 D 进行与运算得到与拟合双曲线重合的点,进行目标判定的准则为:

1) 计算重合点集占拟合曲线的比率,设定阈值(本文设为 0.5),大于阈值则判定该区域为目标,同时记录该坐标系的原点坐标;

2) 对准则 1) 所判定的目标,采用 2 种方法进行合并处理:(1) 分析由准则 1) 记录的各原点所在坐标系下的双曲线基本参量,如果同时满足焦点坐标接近和距离差 dr 差异较小,则合并为同一个原点;(2) 计算上一步合并之后的各原点之间的距离,距离相近的原点合并为一个点,作为最终的 FOA,相应的区域则为最终检测得到的目标区域.

准则 2) 可以有效地对检测出的目标进行合并处理,避免出现同一个目标被检测出两次的情形.

4 实验结果与分析

本文的实验数据为一组包含 150 帧图像的由远及近的红外图像序列,每帧图像包括两个成组出现的发电厂冷却塔,均为待检测目标. 图 8 给出了部分帧的实验结果,其中(a)为原始红外图像,(b)为利用视觉注意模型提取的显著区域,(c)为检测出的双曲线边缘点,(d)为最终检测得到的目标区域.

统计检测结果由如式(8)给出的查全率和查准率给出,150 帧图像中的目标检测结果(包含 300 个待检测目标)如表 1.

$$\begin{cases} \text{recall} = \frac{\text{hit}}{\text{hit} + \text{miss}} \\ \text{precision} = \frac{\text{hit}}{\text{hit} + \text{false}} \end{cases} \quad (8)$$

表 1 统计结果

Table 1 Statistical results

Target	Hit	Miss	False	Recall/(%)	Precision/(%)
300	296	4	19	98.67	93.97

由图 8 和表 1 可以看出,本文算法具有较好的检测效果. 原因在于基于知识模型的目标检测不同于模板匹配方法,对于图像类型、尺度变化等不敏感. 由于有知识规则的限定,检测的针对性强,检测

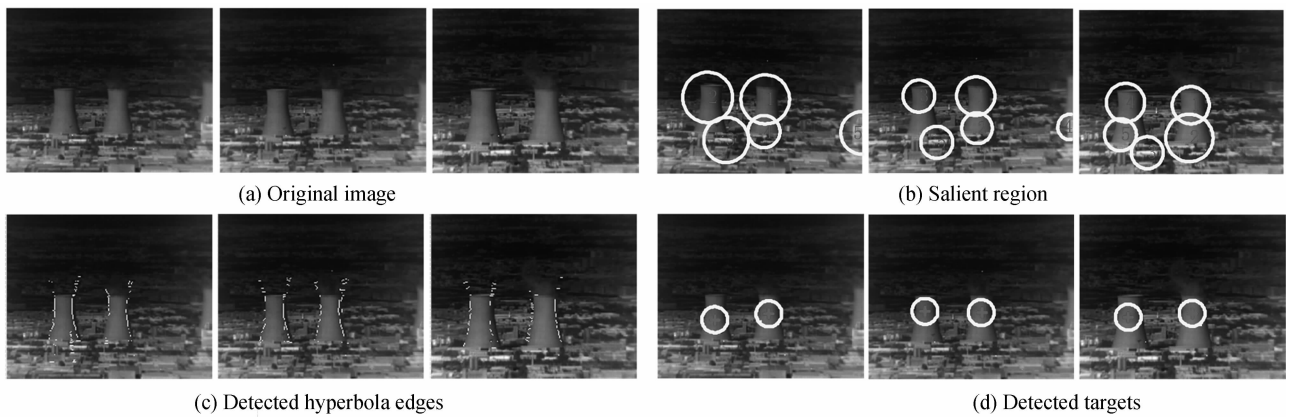


图8 实验结果

Fig. 8 Experimental results

结果比较准确可靠. 本文算法采用改进的视觉注意模型进行感兴趣区的提取, 有效地降低了复杂背景对目标检测的影响, 进一步提高了检测的准确率. 与文献[4]提出的冷却塔检测算法(平均检测率88.23%)相比, 本文算法具有更高的检测准确率; 并且, 本文算法不需要进行基准图制备, 因此不需要提供弹目距离、塔体参量和相机参量等成像参量, 大大降低了作战应用中对基础保障数据的依赖性.

从运行速度上来看, 在 Intel Pentium 2.6 GHz 处理器和 1 GB 内存的硬件配置下, 采用 Matlab 7.0 的编程环境, 本文算法的平均运行时间约为每帧 1.2 s. 虽然本文算法比较复杂, 但由于部分算法可以并行实现, 并且所处理图像的尺寸一般为 320×240 , 如果采用 FPGA 实现, 例如采用 EP3C25 开发板和 VHDL 语言, 速度至少可以提高 10 倍以上, 每秒可以处理 10 帧左右, 完全能够满足实时需要.

5 结论

本文针对红外图像中热电厂冷却塔的目标检测问题, 提出了一种基于知识模型的自动目标检测算法. 首先对传统的 Itti 模型进行了改进, 将局部熵作为红外图像的一种特征, 然后利用改进的视觉注意模型提取显著区域; 在显著区域中提取结构特征边缘, 按照基于知识模型的方法拟合双曲线, 最后根据判定准则检测出冷却塔. 实验结果表明, 本文算法具有较高的查全率和查准率, 验证了算法良好的目标检测性能. 并且, 与模板匹配算法相比, 该方法由于

不需要基准图像的参与, 降低了对数据保障的要求, 因此对该类目标的检测具有较大的应用价值.

参考文献

- [1] 苏娟. 前视红外目标识别与跟踪关键技术研究[R]. 第二炮兵工程大学博士后出站报告, 2012. 10
- [2] 倪维平. 红外成像制导中典型地面目标检测技术研究[D]. 长沙: 国防科技大学, 2006.
- [3] 宋新. 红外地面目标的检测、识别与跟踪技术研究及实现[D]. 长沙: 国防科技大学, 2007.
- [4] MING Die-lie, TIAN Jin-wen. Automatic infrared condensing tower target recognition using gradient vector features [J]. *Journal of Astronautics*, 2010, **31**(4): 1190-1194.
- [5] 明德烈, 田金文. 红外前视对一类特殊建筑目标识别技术研究[J]. *宇航学报*, 2010, **31**(4): 1190-1194.
- [6] ITTI L, KOCH C, NIEBUR E. A model of saliency-based visual attention for rapid scene analysis [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1998, **20**(11): 1254-1259.
- [7] NAVALPAKKAM V, ITTI L. An intergrated model of top-down and bottom-up attention for optimizing detection speed [C]. *Proceedings of IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, New York, USA, 2006: 2049-2056.
- [8] ROSIN P L. A simple method for detecting salient regions[J]. *Pattern Recognition*, 2009, **42**(11): 2363-2371.
- [9] SANG Nong, LI Zheng-long, ZHANG Tian-xu. Applications of human visual attention mechanisms in object detection[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2004, **33**(1): 38-42.
- [10] 桑农, 李正龙, 张天序. 人类视觉注意机制在目标检测中的应用[J]. *红外与激光工程*, 2004, **33**(1): 38-42.
- [9] LIN Yue-wei, FANG Bin, TANG Yuan-yan. A computational model for saliency maps by using local entropy [C]// *Proceedings of the 20th AAAI Conference on Artificial Intelligence*, Atlanta, USA, 2010: 967-973.
- [10] BAN S W, LEE I, LEE M. Dynamic visual selective attention model[J]. *Neurocomputing*, 2008, **71**(4-6): 853-856.