

一种仿射不变的前视红外目标识别方法

赵爱罡 王宏力 杨小冈 陆敬辉 王建永 崔祥祥

第二炮兵工程大学 303 教研室, 陕西 西安 710025

摘要 前视红外目标识别是精确制导武器的关键技术。实际应用中,模板和实时图存在尺度和角度的差异,易导致误匹配。为克服上述问题,提出了一种基于边缘仿射不变坐标的前视红外目标识别算法。以边缘曲线的区域质心为基准点建立局部坐标系,在此坐标系下,边缘点的坐标值具有仿射不变;将边缘的坐标集合作为描述子,利用平均 hausdorff 距离度量边缘的相似性;最后结合边缘的相对位置剔除误匹配,实现前视红外目标的稳健识别。通过三组实验,与基于灰度模板和基于边缘模板的识别算法相比,识别率和稳健性均有所提高。

关键词 图像处理;仿射不变;目标识别;hausdorff 距离;轮廓曲线;红外图像

中图分类号 TP391 文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP52.071501

An Affine Invariant Method of Forward Looking Infra-Red Target Recognition

Zhao Aigang Wang Hongli Yang Xiaogang Lu Jinghui Wang Jianyong
Cui Xiangxiang

303 Teaching and Researching Department of the Second Artillery Engineering University,
Xi'an, Shannxi 710025, China

Abstract Forward looking infrared target recognition is key technology in precision-guided weapon. In practical application, it is likely to cause wrong matching because of discrepancy of scale and angle between template and real images. In order to solve problem mentioned above, A forward looking infrared target recognition algorithm based on edge's affine invariant coordinate. Establishing coordinate system based on regional centroids of curvic edge. Coordinates of edge points is affine invariant in the established coordinate system. Taking the set of edge points' coordinates as edge descriptor and similarity of edge is measured by average hausdorff distance. Wrong matchings are excluded with the help of relative locations among edges and forwarding looking infrared target robust recognition is implemented. Compared with two recognition algorithms based on gray template and edge template, recognition rate and robustness of proposed algorithm are all improved through three videos.

Key words image processing; affine invariance; target recognition; hausdorff distance; contour curve; infrared image

OCIS codes 150.1488; 320.7100; 330.5000

1 引言

红外成像^[1]穿透能力强,隐蔽性好,不受时间限制,能满足全天候作战的要求,在高精尖武器快速发展阶段,受到军事领域的密切关注,前视红外(FILIR)末制导是保证长距离自主导航武器命中精度的手段,通过对敌方目标的识别,获取精确制导武器的相对位置,有效引导武器命中目标。

FLIR 目标识别不同于景象匹配^[2],景象匹配地区一般选取具有显著地形起伏的自然场景,这类场景选取面积大,高度差明显且随时间变化缓慢,获取的特征比较稳定,有利于景象匹配,而 FLIR 末制导成像范围受

收稿日期: 2014-11-04; 收到修改稿日期: 2015-03-13; 网络出版日期: 2015-06-24

基金项目: 国家自然科学基金(61203189)、总装预研基金(9140A01060411JB4701)

作者简介: 赵爱罡(1986—),男,博士研究生,主要从事红外目标制导方面的研究。

E-mail: zhaoaigang1986120@163.com

导师简介: 王宏力(1965—),男,博士,教授,博士生导师,主要从事精确制导,故障诊断,星光制导等方面的研究。

E-mail: wanghl@sina.cn

到限制,目标周围多为人造地区,难以获取内容稳定的大范围图像,所以 FLIR 多以单个典型目标为对象进行识别。目前,FLIR 自动目标识别算法主要有基于模板匹配和基于知识的识别算法^[3],基于知识的识别算法一般以特征点或特征区域为载体,进行独特性描述,主要适应于图像纹理丰富的可见光图像,红外图像缺乏纹理,且梯度特征^[4]也不明显,不适用基于梯度描述的识别算法,算法需要目标的先验知识,并且针对不同目标需要设计不同的识别策略。基于模板的目标识别算法根据成像距离、高度和角度等制作大量前视基准模板,并装载到精确制导武器上,在飞行末段,借助其他传感器信息,选择合适的基准模板,与实时图进行匹配,找到实时图中的预定目标,实现相对定位。

基于模板匹配的目标识别算法,对基准模板的要求比较严格,要求基准模板与实时图的尺度和角度相差不大,如果存在较大差异,其归一化相关系数或 hausdorff 距离^[5]易呈现多峰,难以确定正确的匹配位置。为增强匹配的稳健性,文献[6]提出了梯度矢量互相关的匹配测度,综合考虑梯度点的强度和方向信息,虽然新增信息提高了目标描述的独特性,但无法从根本上解决尺度和角度的变化问题;文献[7]采用匹配峰值置信度指标确定最佳的匹配位置,可以去除一些伪匹配点,但效果不佳,仍存在一些置信度相同的匹配点;Munder 等^[8]采用建立更多的形状模板库的方式来解决目标的形变,将实例和库中所有模板逐一对比,效果有所提升,但是大大增加了对比时间和计算成本。

针对基准模板和实时图差异带来的匹配问题,提出了基于结构边缘仿射不变坐标的匹配算法。首先确定灰度曲线三个不共线的仿射不变点,所提选取扩展质心和区域质心作为仿射不变基准点,则三点组成一个局部坐标系,其次计算边缘点在此坐标系下的坐标,即相对于仿射不变点的几何位置,此坐标值具有仿射不变性,将边缘的坐标集合作为描述子,有效抵抗了尺度和角度的变化,降低了对基准模板的要求,提高了识别率。算法流程图如图 1。

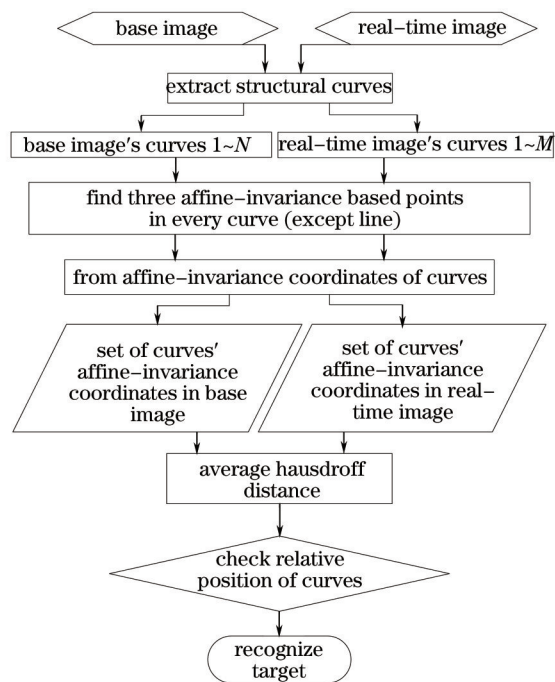


图 1 所提算法流程图

Fig.1 Flowchart of the proposed algorithm

2 建立局部坐标系

通过对大量典型目标进行红外特性分析可知,红外特性易受时间、天气等因素的影响,灰度特征极不稳定,但其对比特性比较稳定,轮廓边缘在大量红外图像中具有较好的对应关系,因此本文以轮廓边缘为特征展开研究。

2.1 结构边缘

采用 canny 算子获取图像的二值轮廓,根据连通特性抽取边缘,如果边缘之间的端点距离很近,则认为是

一条边缘。由于轮廓存在大量杂乱散碎的边缘线段,大都是噪声或是周围杂乱背景造成的,典型目标的边缘多为直线或是平滑曲线,较短的边缘不能反应目标的形状特征,曲率一般较小,因此计算每条边缘的平均曲率和长度,并选择长度较长和平均曲率较小的边缘,定义为图像的结构边缘,去除了大部分杂乱散碎边缘的干扰,保留能反映目标形状的主要边缘。图2所示为基准模板和实时图,以及对应的边缘图和结构边缘图。

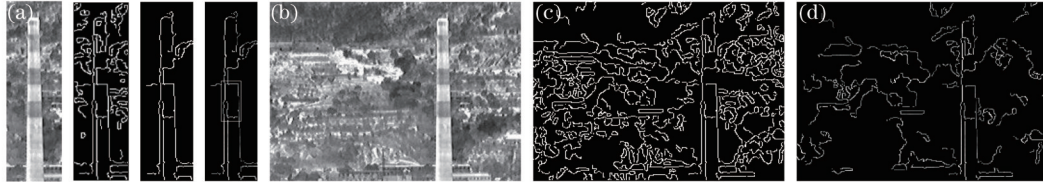


图2 结构边缘提取。(a) 基准图及结构边缘图; (b) 实时图; (c) 实时边缘图; (d) 实时灰度结构边缘图
Fig.2 Structural edge extraction. (a) Base image and structural edge image; (b) real-time image; (c) real-time edge image; (d) real-time gray structural edge image

图2(a)依次为:红外基准模板、轮廓边缘图、二值结构边缘图和灰度结构边缘图,图2(b)为实时图,图2(c)为提取的轮廓边缘,图2(d)为结构边缘效果图,对比可知,通过长度和平均曲率的筛选,去除了大部分细小杂乱的边缘,提取的结构边缘能更好地表示图像的主要形状。为确定仿射不变基准点,将二值结构边缘映射到灰度图像,提取灰度结构边缘。

2.2 仿射不变基准点

定义仿射变换^[9] $A = A\{T, t\}$, 表达式为

$$A(x) = Tx + t, \quad (1)$$

式中 $t, x \in R^2$, T 为 2×2 非奇异实数矩阵。

设 $f(x): R^2 \rightarrow R, f(x) \geq 0$ 是图像的灰度值函数,用 f' , x' 分别表示仿射变换 A 作用于图像后的灰度函数值和坐标值,则有:

$$f'(x') = f \cdot A^{-1}(x') = f(T^{-1}x' - T^{-1}t) = f(x), \quad (2)$$

仿射变换是图像坐标的一一映射,对应位置的灰度值保持不变。

设有非线性函数 $g(x)$ 满足:

$$g(x) = \begin{cases} 0, & x = 0 \\ \text{Increasing}, & x > 0 \end{cases} \quad (3)$$

定义图像 $f(x)$ 的扩展质心 C 为

$$C_g(x) = \frac{\sum_{x \in Z^2} xg[f(x)]}{\sum_{x \in Z^2} g[f(x)]}. \quad (4)$$

函数 $g(x)$ 不改变像素的大小顺序,对坐标值没有影响,只改变像素的灰度值,且只作用于灰度值大于零的像素,排除了背景对扩展质心的影响,对仿射变换图像求取扩展质心为

$$C_g(x') = \frac{\sum_{x' \in Z^2} x'g[f'(x')]}{\sum_{x' \in Z^2} g[f'(x')]} = \frac{\sum_{x \in Z^2} (Tx + t)g[f(x)]}{\sum_{x \in Z^2} g[f(x)]} = \frac{T \left\{ \sum_{x \in Z^2} xg[f(x)] \right\}}{\sum_{x \in Z^2} g[f(x)]} + t = T[C_g(x)] + t. \quad (5)$$

由上式知,当 $g(x) = x$ 时,为普通质心的计算公式, $C_g(x)$ 和普通质心具有相同的性质,均为仿射不变点。令 X 为扩展质心确定的直线上任一点:

$$X = C_j^i(x) + k[C_g^j(x) - C_j^i(x)], \quad (6)$$

式中 $k \in R, i \neq j, i, j \in Z^+, C_g^j$ 和 C_j^i 为不同的扩展质心。同样,在仿射变换图像中,存在相同非线性函数确定的两个扩展质心,确定的直线表示为

$$X' = C_g^i(x') + k[C_g^j(x') - C_g^i(x')] = TX + t. \quad (7)$$

因 X 为任一点,两个扩展质心确定的直线,与仿射变换后对应扩展质心确定的直线具有仿射变换关系,

因此,直线划分的区域也具有仿射变换关系,即具有相同的图像内容,这是获取稳定基准点的基础。

设满足(3)式的两个非线性函数为

$$\begin{cases} g_1(x) = x^5 \\ g_2(x) = \log(x+1) \end{cases} \quad (8)$$

使用(8)式作用于像素值获取的两个扩展质心,记为: C_1 , C_2 , 两扩展质心分别贴近灰度结构边缘的亮区域和暗区域,如图3所示。

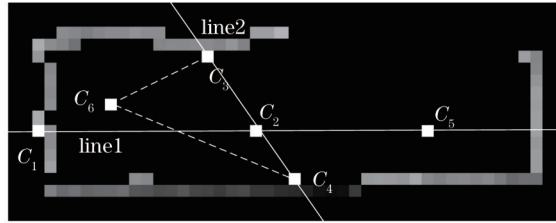


图3 结构曲线仿射不变基准点

Fig.3 Affine-invariance based points in structural curve

上图是图2(a)灰度结构边缘图中白色框中的一条结构曲线(暂不考虑直线),直线1为扩展质心 C_1 和 C_2 确定的直线,定义直线上方区域为:将坐标带入直线一般式,值大于零的区域,同理,值小于零的区域定义为直线的下方区域。直线1上方区域和下方区域的普通质心分别为 C_3 和 C_4 ,直线2是过 C_3 和 C_4 的直线,同样计算直线2上方和下方的普通质心记为: C_5 和 C_6 ,可以证明这些质心均是仿射不变的,选取 C_3 、 C_4 和 C_6 为基准点建立局部坐标系,这样保证了三个基准点不共线(灰度结构直线除外),且之间的距离尽量大,建立的局部坐标系比较稳定。

3 仿射不变特征空间

如图3所示,若以质心 C_6 为原点,沿向量 $C_3 - C_6$ 和向量 $C_4 - C_6$ 的方向,建立局部坐标系,曲线上任一点 C_{p_i} , $i \in \Omega$, Ω 为曲线点标记,可表示为

$$C_{p_i} = C_6 + \alpha_i(C_3 - C_6) + \beta_i(C_4 - C_6), \quad (9)$$

在仿射变换图像中,以对应的质心为基准,按相同方式建立局部坐标系,则对应曲线上任一点可表示为

$$C'_{p_i} = C'_6 + \alpha'_i(C'_3 - C'_6) + \beta'_i(C'_4 - C'_6), \quad (10)$$

将仿射变换代入上式并化简为

$$T(C_{p_i}) = T[C_6 + \alpha_i(C_3 - C_6) + \beta_i(C_4 - C_6)]. \quad (11)$$

因 T 是非奇异矩阵,对比(11)式和(9)式可得: $\alpha'_i = \alpha_i$, $\beta'_i = \beta_i$,由此可知图像经过仿射变换后,曲线点的局部坐标不变,相同坐标 (α, β) 对应的曲线点相同,定义以 (α, β) 为坐标的空间为仿射不变特征空间,以图3所示结构曲线为例,其不变特征如图4所示。

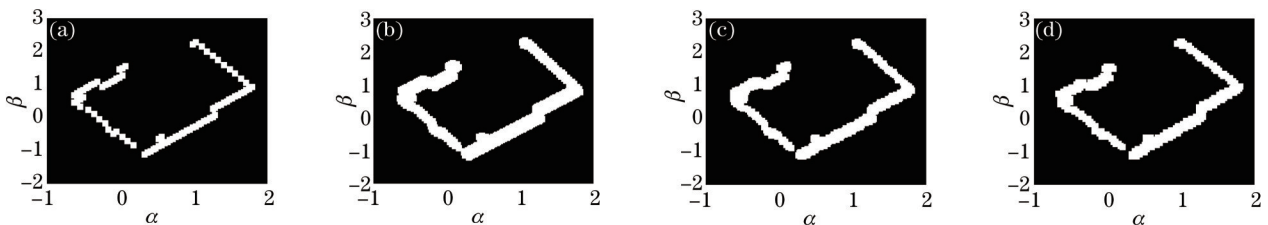


图4 结构曲线的不变特征。(a) 图3的不变特征;(b) 放大2倍后不变特征;(c) 旋转30°后不变特征;(d) 相隔10帧的不变特征

Fig.4 Invariant feature of structural curve. (a) Fig.3's invariant feature; (b) invariant feature of scale=2;

(c) invariant feature of rotation's angle=30°; (d) invariant feature of frame apart ten

前视红外系统涉及的主要变换有缩放和旋转,图4为针对实际情况进行的实验效果图,与原图相比,曲线经过各种仿射变换,对应不变特征空间中的曲线的特征以及对应的坐标值比较稳定,曲线略有形变,这是因为确定局部坐标系的向量夹角并非直角,坐标系转换过程是一次仿射变换。在实际序列中,不同帧之间的结构曲线形状相似,但像素个数以及位置存在微小差异,获取的不变特征形状大体相似,并非像素的一一对应。

4 匹配识别算法

通过对每条结构边缘建立仿射不变局部坐标系,边缘每一点的坐标值稳定不变,借助边缘坐标集合对结构边缘进行描述,使用平均 hausdorff 距离度量相似性,并设计了稳健的匹配准则对目标进行识别。

4.1 结构边缘相似性度量

对集合进行相似性度量,常用的度量方式为 hausdorff 距离,hausdorff 距离是最小距离中的最大距离,是一种极值距离,选择某两点的距离来衡量集合之间的相似性,稳健性强,但是易受噪声干扰,经常出现一个集合与多个集合距离相等的情况,难以确定匹配对象,采用平均 hausdorff 距离度量集合相似性,将每一点的最小距离取平均,描述集合之间的距离,公式如下:

$$M_{HD}(A, B) = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M \min_{distance}(a_i, B), \quad (12)$$

式中 A 表示实时图中某结构边缘的坐标集合, B 表示基准模板某结构边缘的坐标集合, $\min_{distance}(a_i, B)$ 表示坐标 a_i 到集合 B 的最小距离, M 为实时图某结构边缘的长度。为简化计算,将模板中的结构边缘在不变特征空间中进行距离变换,每对 (α, β) 坐标对应的灰度值为距离最近边缘点的距离,如图 5 所示。

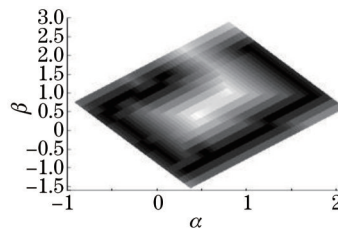


图 5 不变特征图的距离变换

Fig.5 Distance transform of invariant feature image

匹配过程中,在不变特征空间中,对模板中的少量结构边缘进行距离变换,实时图结构边缘只需计算边缘点的局部坐标,然后在距离变换图中按坐标索引最小距离值,求取平均值即为匹配的度量值。

上述只针对结构曲线建立了局部坐标系,实际图像序列中,结构边缘也会包含一部分直线,但直线所有质心一定在直线上,无法获得不共线的向量,局部坐标系无法建立。为此,先判断结构边缘是否为直线,计算结构边缘的扩展质心 $C_1(X_1, Y_1)$, $C_2(X_2, Y_2)$ 和区域质心 $C_3(X_3, Y_3)$, 则向量 $C_2 - C_1$ 和向量 $C_3 - C_1$ 的夹角正弦为:

$$\sin(\theta) = \frac{\begin{vmatrix} X_2 - X_1 & Y_2 - Y_1 \\ X_3 - X_1 & Y_3 - Y_1 \end{vmatrix}}{|C_2 - C_1| |C_3 - C_1|}, \quad (13)$$

若 $|\sin(\theta)| < 0.2$ 则判定为直线,不再计算其余质心,而是寻找距离直线最近的结构曲线,选取一定范围,计算所有结构曲线的扩展质心 $C_i, i \in Z^+$ 到直线 C_1, C_2 的距离,若存在距离相等的多条结构曲线,进一步比较点 C_i 到点 C_1 的距离,选取距离最近的结构曲线,在曲线局部坐标系中计算直线边缘各点的坐标,组成坐标集合对直线进行描述。

4.2 识别策略

目标的主要轮廓是由结构边缘组成的,不但包含每个结构边缘的特征信息,还包含结构边缘之间的相对位置。匹配过程中,有时会存在多对相似的结构边缘,仅靠片段自身特征无法确定真实的匹配对象,为此,每个结构边缘除了描述自身的坐标集合外,还需加入描述相对几何位置的坐标集合。

对于结构直线,依照 3.1 节准则,寻找距离次近的结构曲线,在其局部坐标系中计算直线各点的坐标,所得坐标集合描述结构直线的相对位置。结构曲线相对位置的描述类似于直线的方式,寻找距离本曲线最近的结构曲线,在其局部坐标系中,计算本曲线坐标值,组成集合作为曲线相对位置的描述。具体匹配步骤如下:

- 1) 结构边缘特征匹配。实时图中某结构边缘与基准模板中全部结构边缘进行相似性度量,选取最小度量值,记为 d_{\min} , 若其余度量值满足 $d_i \leq 1.2d_{\min}, i \in Z^+$, 则作为候选匹配边缘;
- 2) 利用相对位置信息优选匹配边缘。对于一对多的匹配情况,对描述相对位置的坐标集合进行相似性

度量,选取度量值最小的边缘作为最佳匹配边缘;

3) 判定目标识别结果。假设基准图有 L 条结构曲线,对于每条结构曲线,确定局部坐标系的不变基准点有 3 个,分别为 C_3 、 C_4 和 C_6 ,进行如下判定:

① 计算基准图全部结构曲线不变基准点坐标的方差 (σ_{bx}, σ_{by});

② 计算实时图中最佳匹配曲线不变基准点坐标均值 (\bar{x}, \bar{y}),去除距离较远的 L 个不变基准点,计算剩余基准点坐标的方差 (σ_{rx}, σ_{ry});

③ 若 $0.7 \leq \sqrt{\sigma_{bx}^2 + \sigma_{by}^2} / \sqrt{\sigma_{rx}^2 + \sigma_{ry}^2} \leq 1.3$ 则目标识别成功;否则目标识别失败。

5 实验结果与分析

为验证所提算法的有效性,与基于灰度模板和基于边缘模板的识别算法做比较,两种算法将目标作为一个整体,在实时图中进行搜索匹配,基于灰度模板的识别算法使用的度量方式为归一化积相关,基于边缘模板的匹配算法借助距离变换进行度量。实验数据来自三组机载 FLIR 图像序列,待识别的目标分别为低矮环境中的烟筒,城市环境中的建筑物和发电厂的冷却塔。在三组图像序列中分别进行识别率和稳健性对比实验。

5.1 识别率对比实验

模板制备一般根据弹目距离和角度,采取其他保障手段或图像变换获取目标图像,预先装订到精导武器上,然后根据弹目距离切换模板进行目标识别。由于缺乏必要的设备和技术支持,在实验中,目标模板取自图像序列,每 15 帧制备一个模板,为贴近应用环境,进行尺度和角度随机变换,尺度变换范围 0.8~1.2,角度变换范围 $-5^\circ \sim 5^\circ$ 。实验结果如表 1 所示。

表 1 识别率实验

Table 1 Experiment of recognition probability

Target (frame numbers)	Gray base image	Edge base image	Proposed method
Chimney(552)	508(92.0%)	519(94.0%)	534(96.7%)
Cooling tower(743)	562(75.6%)	621(83.6%)	681(91.7%)
Building(675)	481(71.3%)	503(74.5%)	595(88.1%)

实验结果表明,在使用等数量模板的情况下,所提算法在三组图像序列中均获得较高的识别率。烟筒图像序列中,环境低矮,目标在图像中比较突出,灰度特征和边缘特征与背景的差异都比较明显,三种识别方法均获得了较高的识别率;而建筑物图像序列中,建筑物的灰度和边缘特征与背景差异小,存在大量的误匹配,三种识别算法的识别率均比较低。

基于灰度模板的归一化积相关识别算法,主要度量与模板灰度分布的相似性,能够消除灰度整体变化的影响,但是模板和实时图的差异受到噪声和成像环境的影响比较严重,特别是角度和尺度的不一致,常出现边界未对准的情况,灰度分布无法准确度量,造成匹配性能较差;基于边缘模板的匹配算法,以比较稳定的边缘为特征,稳健的边缘度量方法容许局部未对准和微小变形的情况,识别率高于灰度模板识别算法,但实时图中常存在边缘密集区域,经过距离变换后,此区域的整体灰度较小,匹配度量值也偏低,而随着模板和实时图的尺度和角度差异增大,真实位置的度量值变大,难以区分真实位置和伪匹配位置,易造成误识别;所提算法将目标边缘分解,以单个边缘片段为对象,构造局部仿射不变坐标系,在仿射变换下,边缘点局部坐标值保持不变,组成坐标集合对结构边缘进行描述,添加相对位置信息,剔除度量值相近的伪目标,有效解决了尺度和角度变化的问题,识别率得到了显著提高。

5.2 稳健性对比实验

对敌方目标来说,一般难以获取与实时图距离和角度一致的模板图像,甚至会存在不可预料的差异,算法的稳健性是任务成败的又一关键因素。实验通过减少模板的数量,观察算法识别率的变化,对算法的稳健性进行研究。

图 6 的横坐标表示每个模板匹配的帧数,即模板的制备间隔,纵坐标表示算法的识别率。单个模板的制备方法不变,只降低模板制备的频率,对于每个图像序列,模板个数越少,模板和实时图的差异就会越大,如果算法的识别率比较稳定,说明算法稳健性较强。

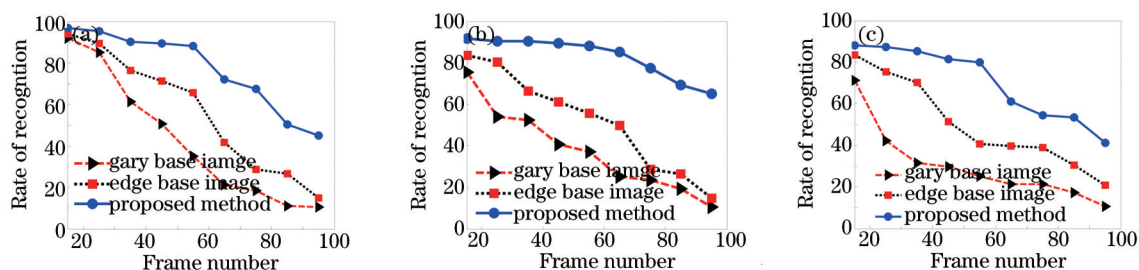


图6 算法稳健性实验。(a) 烟筒图像序列稳健性实验;(b) 冷却塔图像序列稳健性实验;(c) 建筑物图像序列稳健性实验

Fig.6 Experiment of algorithms' robustness. (a) Experiment of robustness for chimney image sequence; (b) experiment of robustness for cooling tower image sequence; (c) experiment of robustness for building image sequence

由图6可知,在三种图像序列中,与其他算法相比,所提算法识别率降低的幅度最小,算法比较稳健。模板的制备间隔加大,会导致模板与实时图的差异变大,特别是尺度信息,目标模板与实时图中的目标尺寸差距逐渐变大,基于模板的识别方法将度量范围限定在模板内,对于模板与目标无法对齐的情况,度量内容是不同的,度量值的大小更是无法预测,所以基于灰度模板和边缘模板的识别算法识别率降低幅度比较大;边缘特征较灰度特征较为稳定,基于边缘模板的度量值在真实目标处,随尺度均匀变化,而基于灰度模板的度量值变化快速,且变化趋势无法预料,存在较多的伪匹配位置,故呈现图6所示趋势,基于灰度模板的识别算法识别率降低相对明显;所提算法脱离了模板大小的限制,而是对模板的内容解析,提取结构边缘,以结构曲线的仿射不变基准点为基准,建立局部坐标系,将结构边缘的坐标集合可视化,生成不变特征空间,在不变特征空间进行相似性度量,对尺度和角度变化比较稳健,对存在相似边缘的情况,初步匹配会有多个候选匹配对象,利用结构边缘的相对位置精选匹配对象,有效剔除了误匹配,最后通过计算目标边缘特征基准点的方差,判定目标识别结果,故所提算法识别率最为稳健。

图6所示,三种图像序列中,所提算法识别率均有下降,但幅度不同,其原因为:1) 所提算法以结构边缘为基础,随模板制备间隔增大,模板和实时图中真实目标的边缘提取不一致,导致识别率降低;2) 目标与背景红外特性的差异显著性不同,算法识别降低的幅度也不同。图6(b)序列中冷却塔热辐射特性与周围环境差异明显,轮廓边缘提取稳定,所以识别率较稳定,图6(c)序列中,因目标与背景的红外辐射近似,导致边缘提取不稳定且相似性边缘较多,识别率降低幅度大。

识别时,为应对轮廓边缘提取不稳定的情况,剔除已识别的部分结构边缘,设计匹配成功的结构边缘不少于2/3,且符合目标整体的特性,则判定识别成功,进一步增强了算法的稳健性。

6 结 论

在前视红外目标识别中,模板和实时图的差异是造成识别失败的主要原因。针对这一问题,提出了一种基于边缘仿射不变坐标的目标识别方法。该方法提取目标的主要结构边缘,计算结构曲线的仿射不变基准点,构造不变特征空间,有效抵抗了尺度和角度的变化,在此空间进行边缘的相似性度量,借助相对位置选择最优的匹配对象,实验结果表明该算法具有较高识别率且稳健性较好,对复杂场景下典型目标的匹配识别具有一定的研究价值。

参 考 文 献

- 1 Guo Yongcai, Tan Yong, Gao Chao. Level set based segmentation of moving humans in thermal infrared sequences[J]. *J Infrared Millim Waves*, 2014, 33(1): 106-116.
- 郭永彩, 谭 勇, 高 潮. 基于水平集的热红外运动人体目标分割算法[J]. *红外与毫米波学报*, 2014, 33(1): 106-116.
- 2 Yang Xiaogang. On Dynamic Scene Matching Approach Design and Application[R]. Xi'an: The Second Artillery Engineering College, 2009.
- 杨小冈. 动态影像匹配算法设计与应用研究[R]. 西安: 第二炮兵工程学院, 2009.
- 3 Gong J, Fan G, Yu L, *et al.* Joint view-identity manifold for infrared target tracking and recognition[J]. *Computer Vision and Image Understanding*, 2014, 118: 211-224.
- 4 Zhang Jing, Sang Hongshi. SIFT matching method based on base scale transformation[J]. *J Infrared Millim Waves*, 2014, 33(2): 177-182.

- 张 静, 桑红石. 基于初始尺度变换的SIFT匹配算法[J]. 红外与毫米波学报, 2014, 33(2): 177-182.
- 5 Cao Zhiguo, Yan Ruicheng, Song Zhe. Approach on fuzzyshape context matching between infrared images and visible image[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2008, 37(6): 1095-1100.
- 曹治国, 鄢睿丞, 宋 喆. 利用模糊形状上下文关系的红外与可见光图像匹配方法[J]. 红外与激光工程, 2008, 37(6): 1095-1100.
- 6 Ming Delie, Tian Jinwen. Automatic infrared condensing tower target recognition using gradient vector features[J]. *Journal of Astronautics*, 2010, 31(4): 1190-1194.
- 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.
- 7 Su Juan, Xu Qingsong, Liu Gang. A forward looking infrared target recognition algorithm based on edge matching[J]. *Acta Armamentarii*, 2012, 33(3): 271-277.
- 苏 娟, 徐青松, 刘 刚. 一种基于边缘匹配的前视红外目标识别算法[J]. 兵工学报, 2012, 33(3): 271-277.
- 8 Munder S, Schnorr C, Gavrila D M. Pedestrian detection and tracking using a mixture of view-based shape-texture models[J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2008, 9(2): 333-343.
- 9 Abadi M S E, Danaee A R. Low computational complexity family of affine projection algorithms over adaptive distributed incremental networks[J]. *AEU-International Journal of Electronics and Communications*, 2014, 68(2): 97-110.

栏目编辑: 张浩佳