

估算红外成像作用空间分辨率的新方法

陈艳菲¹, 王利恒¹, 王洪伟²

- (1. 武汉工程大学 电气信息学院, 湖北 武汉 430205;
2. 核动力运行研究所 在役中心, 湖北 武汉 430223)

摘要: 提出了一种新的基于特征熵的估算红外成像作用空间分辨率的方法, 研究红外目标在各分辨率等级(发现、识别、确认)所需的红外成像空间分辨率。首先, 通过下采样获取各分辨率等级下的目标图像; 其次, 提取目标的特征(纹理、形状和全局统计特征), 并对目标的特征空间进行归一化, 得到其特征直方图; 然后通过计算其特征熵, 度量目标的信息量; 最后根据设定的阈值, 给出红外目标在不同的识别等级下所需的最低成像分辨率结论, 并以计算机仿真红外目标为例进行验证。实验结果表明: 文中结论与识别结果较好吻合, 能够为红外识别系统的优化设计和分析提供参考依据。

关键词: 红外成像; 空间分辨率; 目标识别性能; 特征熵

中图分类号: TN216 文献标志码: A 文章编号: 1007-2276(2014)01-0033-06

New method to estimate IR imaging operating spatial resolution

Chen Yanfei¹, Wang Liheng¹, Wang Hongwei²

- (1. School of Electrical and Information Engineering, Wuhan Institute of Technology, Wuhan 430205, China;
2. In Service Centre, Institute for Nuclear Power Operation, Wuhan 430223, China)

Abstract: In order to research the desired imaging spatial resolution of IR targets under different discrimination levels, including detection, recognition, and identification, a new method based on feature entropy, which is used to estimate IR imaging operating spatial resolution, was proposed. Firstly, IR target images under different resolution grades were obtained by down sampling. Secondly, IR target features extracted, including texture, shape and global statistical features, were normalized to the corresponding feature spaces to obtain the feature histograms. Thirdly, feature entropies of IR targets were calculated in order to measure the information of targets. Finally, according to the set thresholds, the desired lowest imaging spatial resolutions of IR targets under different discrimination levels were obtained, and taking the computer simulated IR targets for example, the presented method was demonstrated. The experiment results show that the conclusions are in good agreement with identification results, which can provide reference for optimization design and analysis of the infrared recognition system.

Key words: IR imaging; spatial resolution; performance of target recognition; feature entropy

收稿日期: 2013-05-10; 修订日期: 2013-06-25

基金项目: 国家自然科学基金(61271363; 61175013)

作者简介: 陈艳菲(1980-), 女, 讲师, 博士, 主要从事红外技术、图像处理方面的研究。Email: chenyf1007@163.com

0 引言

随着自动目标识别技术的快速发展,特别是在军事领域的广泛应用,对红外目标识别所需要的热成像作用空间分辨率有迫切的需求。分辨率过高,则获取的数据量大,增加处理负担,同时也增加了热成像系统研制的难度和研制成本;而分辨率过低,则不能有效识别有价值目标。因此确定能满足任务需求的、合理的热成像作用空间分辨率,可以为相关系统的优化设计和分析提供参考依据。

目标识别任务可借助于过程所能达到的识别水平来定义。文中把目标识别性能的描述粗分为发现、识别、确认三个等级:

(1) 目标发现指找出具有意义的各类单位、物体或活动等的所在位置;

(2) 目标识别指确定所发现目标所属的类别(如车辆、飞机、舰船等);

(3) 目标确认指辨别目标在已知类别中所属的具体品种(如是小汽车还是大型卡车等)。

可见从目标发现到目标识别,直至目标确认,各等级所需的成像分辨率是逐渐增加的,而所针对的目标类别是愈加具体的。

目前从目标识别的角度评估热成像系统的性能,确定其所需的成像作用空间分辨率,就识别主体的不同,可分为两种模式:基于人眼视觉的模式和基于机器视觉的模式。基于人眼视觉的模式属于热成像系统静态性能模型的一部分,以系统最小可分辨温差(MRTD)作为参数,参考约翰逊准则,用人眼来观察完成识别^[1-5]。该性能模型认为目标和背景都是均匀的,没有考虑到目标的细节和形状等因素对系统性能的影响;并且这类模型主要用于由人眼来完成探测识别的红外成像系统。基于机器视觉的模式^[6-10]即自动目标识别,由于自动目标识别算法的多样性,使得确定自动目标识别性能与图像分辨率的关系难度很大。文中从信息论的角度出发,提出基于目标特征熵的模式。

1 基本思想

像素是图像的基本单位,像素的灰度和像素间的梯度是构成任何一幅图像的两种基本要素。像素

的灰度提供图像的纹理特征,像素的梯度提供图像的形状特征。通常,随着图像分辨率的降低,纹理特征在图像信息量中所占的份量越来越少,相对而言,形状特征所占的比重越来越大。但当分辨率低到一定程度后,目标不存在纹理特征和形状特征,只有目标和背景的整体灰度对比度。因此,在确定目标的发现级最低分辨率时主要考虑目标和背景的整体灰度对比度,而确定识别级所需的最低分辨率时,主要考虑目标的形状特征,而在确认级,图像分辨率较高,纹理细节特征比较丰富,则需同时考虑纹理特征和形状特征。

由于以上原因,文中提出基于特征熵的机器视觉模式,通过分析目标特征,计算目标所包含的信息量,研究目标识别性能与图像分辨率的关系,即对于目标发现、目标识别和目标确认,针对每一类目标,如飞机,及选定的某一图像分辨率,提取目标的特征,并计算其特征熵。根据特征熵值及设定的相应识别等级的门限熵值,得到各识别等级的最低分辨率要求。文中方法示意图如图 1 所示。

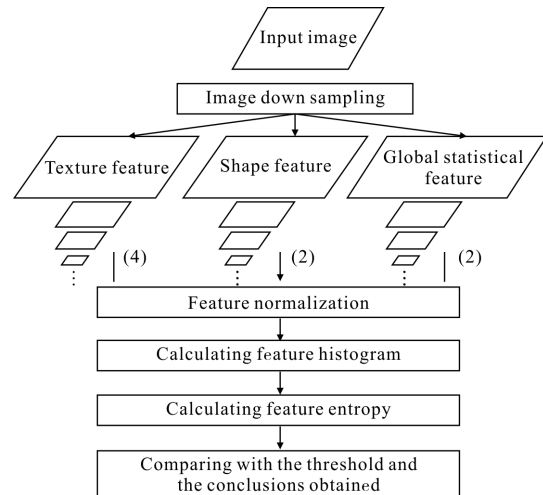


图 1 文中方法结构图

Fig.1 Block diagram of the proposed method

2 特征提取及归一化

传统的特征提取方法是建立在目标分割的基础上的,通过分割获得目标的灰度信息及形状信息,并与已知的待识别目标的灰度或形状特征进行比较,实现目标分类。典型的特征有:图像熵特征、纹理统计特征、直方图不变矩特征以及傅立叶仿射不变特

征等。这里提取随图像分辨率变化的图像纹理特征、形状特征和全局统计特征。

2.1 纹理特征

纹理是图像分析中常用的概念,一般说来可以认为是由许多相互接近的,互相编织的元素构成的。为了既利用图像的灰度信息又利用像素相对位置的空间信息,文中采用共生矩阵描述目标的纹理特征。共生矩阵定义为一个已知方向和距离的函数,或者换句话说是在图像中沿 X 轴方向和 Y 轴方向的位移量(dx,dy)的函数。对于已知位移量(dx,dy),共生矩阵的元素(i,j)的值是当(x+dx,y+dy)位置的灰度值是 j 时,当前位置(x,y)的灰度值是 i 的次数(对图像中的每个像素点进行计算)。共生矩阵的计算式为:

$$C^{dx,dy}(i,j)=P(G(x,y)=i/G(x+dx,y+dy)=j) \quad (1)$$

通常取 64×64 的窗口图像计算共生矩阵,若目标图像尺寸大于窗口图像尺寸,则通过在目标图像中来回扫描窗口图像计算共生矩阵,这样共生矩阵就和每个图像位置联系起来,窗口的中心记为(x_i,y_i),相应的共生矩阵记为 C_{x_i,y_i}^{dx,dy}(i,j)。基于共生矩阵可以计算几个常用的纹理描述符用以描述目标的纹理特征,即:纹理二阶矩 W_M 描述图像的平滑性或均匀性,熵 W_E 度量图像内容的随机性,对比度 W_C 是共生矩阵中各元素灰度值差的一阶矩,均匀性 W_H 从某种程度上可看作是 W_C 的倒数,计算公式分别如下:

$$W_M = \sum_i \sum_j C^2(i,j) \quad (2)$$

$$W_E = - \sum_i \sum_j C(i,j) \log C(i,j) \quad (3)$$

$$W_C = \sum_i \sum_j |i-j| C(i,j) \quad (4)$$

$$W_H = \sum_i \sum_j \frac{C(i,j)}{k+|i-j|} \quad (5)$$

2.2 形状特征

目标的形状特征有许多种描述符,常用的有根据区域面积和周长计算的形状参数、偏心率、圆形性等,而能体现特征随图像分辨率变化的只有目标的圆形性,因此采用目标的圆形性来描述目标的形状特征。圆形性有两个指标,分别为 μ_R 和 σ_R,μ_R 为从区域重心到边界点的平均距离,σ_R 为从区域重心到

边界点的距离的均方差,计算公式分别如下:

$$\mu_R = \frac{1}{K} \sum_{k=0}^{K-1} \left\| (x_k, y_k) - (\bar{x}, \bar{y}) \right\| \quad (6)$$

$$\sigma_R = \frac{1}{K} \sum_{k=0}^{K-1} \left[\left\| (x_k, y_k) - (\bar{x}, \bar{y}) \right\| - \mu_R \right]^2 \quad (7)$$

式中:K 是边界点的个数;(x_k,y_k)为边界上任一点的坐标;(\bar{x},\bar{y})为目标重心的坐标;||·||用于计算两点间的欧氏距离。

2.3 全局统计特征

文中选取图像熵和能量来描述目标的全局统计特征,计算公式分别如下:

$$H(p) = H(p_0, p_2, \dots, p_{255}) = - \sum_0^{255} p_i \log_2 p_i \quad (8)$$

$$E(p) = E(p_0, p_2, \dots, p_{255}) = \sum_0^{255} p_i^2 \quad (9)$$

式中:H(p)为图像熵;E(p)为图像的能量;p_i为图像中像素灰度值 i 出现的概率。

2.4 特征归一化

对于文中所提取的典型特征,不同特征间值的差异很大。比如能量特征的值能达到几百,而均匀性纹理特征的值却不到 1。为了保证所提取的每一个特征对特征熵的贡献是均等的,有必要对每一个特征分别进行归一化处理。为了方便计算特征直方图,把所有特征值都归一化到[0,255]的范围。另一方面,文中所针对的目标的分辨率从发现级到确认级的跨度是很大的,这就导致目标所占像素从一两个变化到几百个。对同一特征而言,不同分辨率的目标的特征值也会产生较大变化。为了尽量减小这种差异对计算特征熵产生的影响,采用如下的公式对每一个特征分别进行归一化。

$$F = \begin{cases} 128 + 127 \times \frac{f - f_{\text{mean}}}{f_{\text{max}} - f_{\text{mean}}} & f > f_{\text{mean}} \\ 128 \times \frac{f - f_{\text{min}}}{f_{\text{mean}} - f_{\text{min}}} & f \leq f_{\text{mean}} \end{cases} \quad (10)$$

式中:f 为提取的特征初值;F 为归一化特征值;f_{mean}, f_{max}, f_{min} 分别为提取的特征的均值,最大值和最小值。每一个特征的均值、最大值和最小值是通过对所研究目标的不同分辨率、不同方位和不同时刻的所有样本进行计算得到。

3 特征熵计算

特征熵是利用熵来度量特征性能的一种有效方法,熵值越高的特征性能越好。其理论依据是根据香农熵准则,熵值越高的特征越平滑,从而能更好的表征目标,有利于目标识别。最大熵准则就是当利用不完全信息进行推测时,可以根据已知信息的具有最大熵的概率分布,得到完整的目标信息量。

对于一幅已知的给定图像 I , 设初步提取的特征参数共有 n 个, 设正整数 $n_{\text{bins}} > 0$ 为正则化特征直方图的位数, 最大特征值 $F_{\text{max}} = \max(F_j)$, 最小特征值 $F_{\text{min}} = \min(F_j) (j=1, 2, \dots, n)$, 量化等级 $d = (F_{\text{max}} - F_{\text{min}}) / n_{\text{bins}}$, 对每一个特征 $F_j (j=1, 2, \dots, n)$, 将其按照量化等级分为相等的 N 段, 记 $r_k^{(j)} (k=1, 2, \dots, N)$, 则

$$l_i (i=1, 2, \dots, n_{\text{bins}}) = |F_{\text{min}} + (i-1)d \leq r_k^{(j)} \leq F_{\text{min}} + id|$$

$$(j=1, 2, \dots, n), (k=1, 2, \dots, N)$$

为满足上述条件的 $r_k^{(j)}$ 的个数, 而 $p_i = l_i / \sum_{j=1}^{n_{\text{bins}}} l_j$, 所以定义特征 F_j 的熵:

$$E = - \sum_{i=1}^{n_{\text{bins}}} p_i \ln p_i \quad (11)$$

4 实验结果及分析

4.1 实验步骤及结论

下面以计算机仿真生成的舰船目标 burke 为例具体阐述此方法的实施步骤。

Step1: 这里仿真 burke 舰船目标的分辨率级别有 1 m、2 m、5 m、10 m 和 15 m, 先取出分辨率为 15 m 的目标模拟图。

Step2: 对目标模拟图进行特征提取。

Step3: 对提取的特征分别计算其正则化特征直方图。

Step4: 利用特征直方图的数据根据熵定义计算其特征熵 E 。

Step5: 按照步骤 1~4 同样可以得出其余分辨率对应的特征熵值 E_2, \dots, E_5 , 绘制目标特征熵值与图像分辨率的关系曲线。

Step6: 根据特征熵值与图像分辨率的关系曲线得出结论, 在一定的特征熵值下所对应的分辨率级

别就为仿真 burke 舰船目标能被发现、识别以及确认所需的最低成像作用空间分辨率。

选取 burke、spruance 和 ticonderoga 三类计算机仿真舰船目标作为实验对象, 如图 2 所示, 分别计算三类目标在各分辨率等级下的特征熵。由于不能得到所有分辨率等级的图像和特征熵值, 为了分析的准确性, 选择三次样条插值对有限的数据进行拟合, 并把图像分辨率与特征熵值的关系曲线和拟合曲线绘制在同一坐标平面, 如图 3 所示。经过大量实验获取的经验, 设定仿真舰船目标在发现、识别、确认各分辨率的特征熵门限分别为 1、2、3。则得到如下结论: 对于仿真舰船目标, 发现、识别、确认所需的最低成像作用空间分辨率分别为 15 m、10 m 和 7 m。

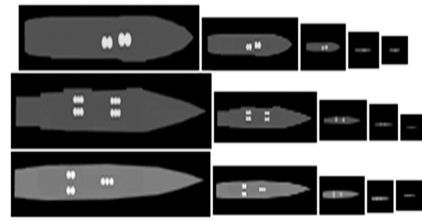


图 2 各分辨率下的仿真舰船目标图

Fig.2 Simulated ship target images under different resolutions

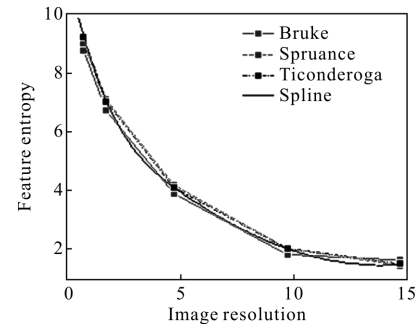


图 3 三类仿真舰船目标特征熵与图像分辨率的关系图

Fig.3 Relational graph between features entropy and resolutions of three simulated ship targets

4.2 实验验证

为了验证上述实验结论的准确性, 文中采用基于指派隶属度的模糊集目标识别算法验证计算机仿真舰船目标在确认级的识别率, 该算法的识别性能对训练样本的依赖性较小, 便于得出较准确的识别率。

实验对象是三类计算机仿真舰船 burke、spruance、

ticonderoga 分别在分辨率为 1 m、2 m、5 m、10 m、15 m 的条件下 0°、260°、-35° 的 12 个不同时刻的图像。这样每一类舰船每一分辨率下有 $3 \times 12 = 36$ 个图像样本。实验过程如下:

(1) 提取图像目标特征、构造训练样本和识别样本集。

在每一分辨率条件下,针对三类舰船的三个不同角度下的 12 个时刻的图像进行特征提取。这里设三类舰船目标值 {bruke, spruance, ticonderoga} = {1,2,3}, 这样,根据目标的特征值和目标值组成了样本集。每一类舰船目标有 36 个样本。三类舰船目

标一共有 108 个样本,取样本中的 54 个奇数样本作为训练样本集,54 个偶数样本作为识别样本集。

(2) 模糊集识别算法对训练样本进行训练。

(3) 用训练好的识别算法对识别样本进行识别,算出每类舰船的识别率。

(4) 利用步骤(1)、(2)、(3)对不同分辨率下的图像进行实验,得出每一分辨率下对应的每类舰船的识别率。

三类仿真舰船目标在各分辨率下的识别率如表 1 所示,通常识别率达到 95% 即达到相应识别等级所需的最低分辨率要求。对上述实验结果进行分析,可

表 1 仿真舰船目标在各分辨率下的识别率

Tab.1 Recognition rates of three simulated ship targets under different resolutions

Type of ship	Recognition rates under different resolutions									
	1 m		2 m		5 m		10 m		15 m	
Bruke	100%		100%		100%		83.3%		94.4%	
Spruance	94%	98.1%	88.9%	96.3%	88.9%	96.3%	88.9%	90.7%	66.7%	87.0%
Ticonderoga	88.9%		100%		66.7%		100%		100%	

以发现识别具体类型所需的分辨率与文中得到的确认级最低分辨率结论基本吻合,从而证明文中方法的有效性。

5 结束语

文中提出了基于特征熵的估算红外成像作用空间分辨率的方法。通过提取不同分辨率级别的待识别目标的特征,并对目标的特征空间进行归一化,得到其特征直方图,计算其特征熵,从而度量目标的信息量,研究自动目标识别性能与图像分辨率的关系,给出目标在不同的识别等级(发现、识别、确认)下所需的最低成像分辨率结论。

上述结论是在完全没有背景干扰的情况下得出的,而在我们的实际目标识别中,总是存在背景的。因此度量背景(杂波)对目标识别性能的影响是非常必要的,这也将是我们下一步工作的重点。

参考文献:

- [1] Ratches J A. Static performance model for thermal imaging systems[J]. *Optical Engineering*, 1976, 15(6): 835-840.
- [2] Leachtenauer J C. Resolution requirements and the Johnson

criteria revisited [C]//AeroSense 2003. International Society for Optics and Photonics, 2003: 1-15.

- [3] Paiva C A. Navy theater ballistic missile defense boost multispectral discrimination requirements for low-resolution detection, classification, and high-resolution aimpoint selection [C]//Aerospace / Defense Sensing and Controls. International Society for Optics and Photonics, 1998: 532-550.
- [4] Li Runshun, Yuan Xiangyan, Fan Zhigang, et al. Operating range prediction of infrared imaging system[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2001, 30(1): 1-3. (in Chinese)
李润顺, 袁祥岩, 范志刚, 等. 红外成像系统作用距离的估算[J]. *红外与激光工程*, 2001, 30(1): 1-3.
- [5] Gao Sifeng, Wu Ping, He Manli, et al. Estimation on the operating range of infrared system under complex atmosphere condition [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2008, 37(6): 941-944. (in Chinese)
高思峰, 吴平, 何曼丽, 等. 复杂大气条件下红外系统作用距离的估算[J]. *红外与激光工程*, 2008, 37(6): 941-944.
- [6] Wang Xiaorui, Zhang Jianqi. Machine vision based IR imaging system detection performance evaluation[J]. *Infrared Millim Waves*, 2003, 22(4): 273-276. (in Chinese)
王晓蕊, 张建奇. 基于机器视觉的红外成像系统探测性能评估[J]. *红外与毫米波学报*, 2003, 22(4): 273-276.

- [7] Hong Hanyu, Zhang Tianxu. Fast restoration approach for rotational motion blurred image based on deconvolution along the blurring paths [J]. *Optical Engineering*, 2003, 42(12): 3471–3486.
- [8] Hong Hanyu, Wang Jin, Zhang Tianxu, et al. Study on acceleration technique of circulation iterative restoration algorithm for infrared target images [J]. *Infrared Millim Waves*, 2008, 27(2): 115–118. (in Chinese)
洪汉玉, 王进, 张天序, 等. 红外目标图像循环迭代复原算法的加速技术研究 [J]. 红外与毫米波学报, 2008, 27(2): 115–118.
- [9] Diao W H, Mao X, Chang L, et al. Operating distance evaluation method for infrared imaging system under complicated backgrounds [J]. *Electronics Letters*, 2009, 45(25): 1309–1310.
- [10] Hong Hanyu, Zhang Tianxu, Yu Guoliang. Regularized restoration algorithm of astronautical turbulence –degraded images using maximum–likelihood estimation [J]. *Journal of Infrared Millim Waves*, 2005, 24(2): 130–134. (in Chinese)
洪汉玉, 张天序, 余国亮. 航天湍流退化图像的极大似然估计规整化复原算法 [J]. 红外与毫米波学报, 2005, 24(2): 130–134.