

基于分形模型的人造目标检测技术*

赵亦工 朱红 向健勇

(西安电子科技大学技术物理系, 陕西, 西安, 710071)

摘要 介绍一种在红外和可见光图像中, 自动检测自然背景中人造目标的方法. 该方法以分形结构做为自然背景的数学模型, 利用自然背景和人造目标在分形模型上的固有差异检测人造目标. 本文还介绍了自适应分形特征的增强及图像检测方法, 并以实际图像的处理结果, 说明人造目标检测方法的效果.

关键词 分形, 目标检测, 图像分割.

引言

人造目标一般可以分解为立方体, 锥体和柱体等理想的几何基元, 而自然背景则是由自然界中许多非几何基元能描述的非常复杂的自然物体所组成的. 现有的一些目标检测技术, 是利用人造目标和自然背景在上述几何构成上的差别, 通过在图像中寻找与人造目标相对应的几何基元及其特征, 或者利用人造目标和自然背景在图像灰度上的差别检测人造目标. 但在实际中, 由于成象系统分辨力有限, 以及自然环境和大气传输特性的综合作用, 在最终获取的图像上, 人造目标与自然物体在几何构成上的固有差别被模糊了, 难以正确地提取人造目标对应的几何基元, 造成误检和漏检; 另一方面, 人造目标和自然背景在灰度上的差别也表现出不稳定性, 例如, 对可见光图像, 光照角度的变化会导致灰度极性颠倒, 从而造成目标检测错误. 因此, 若要在复杂自然背景和不同自然条件下, 准确地检测自然背景中的人造目标, 除研究上述几何基元特征和灰度特征之外, 还要研究能更有效地区分人造目标和自然背景的新特征. 本文介绍基于分形模型的人造目标检测技术.

1 分形模型及其特征的提取

分形是一个点的集合, 该集合的分维数 FD (fractal dimension) 严格大于它的拓扑维数. 分形的一个很重要的性质是它的自相似性. 对于分形曲面, 该性质可以表示为:

$$A(rx) = r^{(2-FD)} A(x), \quad (1)$$

式(1)中 $A(x)$ 为分形曲面的表面积, x 为度量时使用的面积元尺度, r 为尺度因子 ($0 \leq r \leq \infty$)

* 国家自然科学基金和国防科技预研基金资助项目

本文1995年1月24日收到, 修改稿1995年5月8日收到

1), FD 为曲面的分维数, 它描述了曲面的粗糙程度. 式(1)的解为

$$A(x) = ax^{(2-FD)}, \quad (2)$$

式(2)中 a 是一个常数. 从式(2)可以看出, 分形模型具有两个重要的特征: 一是研究对象度量值与度量尺度之间呈指数律关系; 二是研究对象的分维数. 这两个特征是相互独立的.

大量的研究表明: 分形模型在一定的尺度范围内可以很好地与山脉、云层、水面、植被、地貌等自然背景的表面结构相吻合^[1,2], 包含了大多数我们感兴趣的自然背景种类; 人造物体的表面和空间结构与分形模型所表达的规律性之间存在固有的差异, 分形模型所描述的对象中不包含人造目标. 因此若研究对象符合分形模型则可判定其为自然背景, 否则判定为潜在的人造目标. 在判别中我们关心的仅是研究对象是否符合分形模型, 并不关心它的分维数的取值, 后者可以在一定的范围内任意变化, 而不影响判别的结果. 利用分形模型的适合性以区分人造目标和自然背景的思想是本文的出发点.

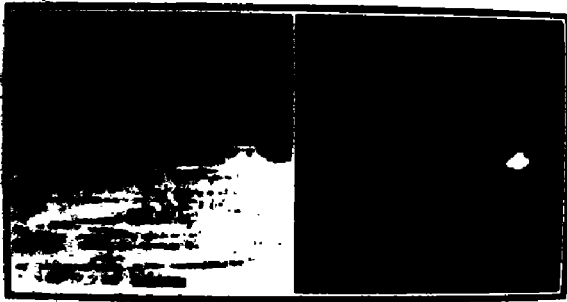


图 1 地面坦克的检测结果(背景为地面和天空)
Fig. 1 Detection of a tank with the ground and the sky as the background

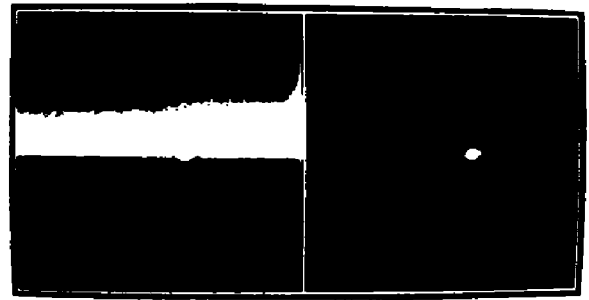


图 2 海面舰船的检测结果(背景为海面 and 天空)
Fig. 2 Detection of two ships with the sea and the sky as the background

本文选择分形布朗运动 FBM(Fractional Brownian Motion)做为自然背景的数学模型, 该模型成功地描述了自然背景的分形模型^[1~3]. 本文采用“毯”覆盖(Blanket-covering)法提取分形模型的特征参数^[3], 在这里图像被视为三维空间中的曲面, 其高度等于该点的图像灰度值. 其算法如下: 设待处理的图像为 $g(i, j)$, 则尺度为零时($r=0$), 覆盖图像的上表面 $U(i, j; 0)$ 和下表面 $L(i, j; 0)$ 定义为

$$U(i, j; 0) = L(i, j; 0) = g(i, j), \quad (3)$$

对于非零尺度, $r=1, 2, \dots, M$, 覆盖图像的不同尺度的上表面 $U(i, j; r)$ 和下表面 $L(i, j; r)$ 可以用下面的递归公式求得

$$U(i, j; r+1) = \max\{U(i, j; r) + 1, \max_{k, m \in \sigma} [U(k, m; r)]\}, \quad (4)$$

$$L(i, j; r+1) = \min\{L(i, j; r) - 1, \min_{k, m \in \sigma} [L(k, m; r)]\}, \quad (5)$$

$$\sigma = \{(k, m) : d[(k, m), (i, j)]^{k, \max} \leq 1\}, \quad (6)$$

式中: $d[(k, m), (i, j)]$ 为 (k, m) 和 (i, j) 两点间的距离. 根据式(4)和(5)的结果, 原始图像 $g(i, j)$ 在 (i, j) 处的表面积 $A(i, j; r)$ 可由下式求得

$$A(i, j; r) = \sum_{k, m} [U(k, m; r) - L(k, m; r)] / 2r, \quad (k, m) \in \Sigma, \quad (7)$$

式中 Σ 为中心在 (i, j) 处的矩形窗. 对于一个分形表面, 根据式(2)有

$$\log[A(r)] = C_2 \log(r) + C_1, \quad (8)$$

因此, 只要用不同尺度时求得的表面积 $A(i, j; r), r=1, 2, \dots, M$, 在 $\log[A(i, j; r)] - \log(r)$ 坐标系中做直线的最小二乘拟合, 即可求得图像 $g(i, j)$ 在矩形窗 Σ 中心处的分维数:

$$FD(i, j) = 2 - C_2. \quad (9)$$

图像 $g(i, j)$ 在矩形窗 Σ 中心处的分形模型拟合误差为

$$e(i, j) = \sum_{k=1}^M |\log[A(k)] - C_2 \log(k) - C_1|^2. \quad (10)$$

对于实际图像的各个局部而言, 其分形模型的特征参数是不同的, 因此应选择一定尺寸的滑窗对窗内的数据进行处理, 以获得局部分形模型的拟合误差. 滑窗的尺寸选择与被检测的目标尺寸相匹配, 该尺寸可以根据实际应用条件进行估计和预测.

式(10)给出的拟合误差可以视为分形模型拟合误差, 它的数值代表度量值和度量尺度之间的关系偏离指数律的程度, 即与分形模型的吻合程度, 表明图像的某个局部是否可以用分形模型描述.

给定原始图像后, 利用上面的算法, 对图像中的各点进行处理, 即可得到分维数分布图和分形模型拟合误差分布图. 根据这两种独立的特征可以从两条途径实现自然背景中人造目标的检测:

(1) 由于人造目标具有光滑的表面, 而自然背景具有粗糙的表面, 因而可以根据分维数的大小区分人造目标和自然背景^[2~4]. 然而, 实际自然条件的影响以及成像系统的作用, 光滑的人造物体在最终获得的图像上很可能与不很粗糙的自然背景没有本质的区别, 使得人造目标和自然背景在分维数的数值上产生交叠, 造成检测错误. 采用实际数据所做的实验证明: 依赖分维数来区分自然背景和人造目标是极不可靠的.

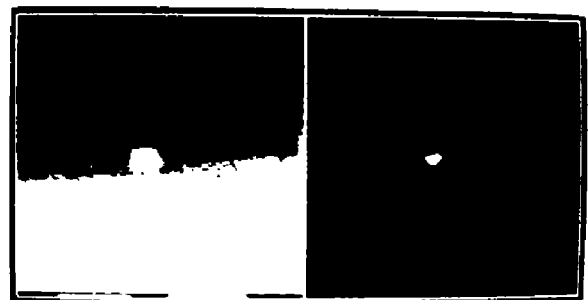


图 3. 空中飞机的检测结果(背景为天空和云层)

Fig. 3 Detection of a plane with the sky and the cloud as the background

(2) 自然背景在一定尺度范围内具有自相似性, 因此用分形模型拟合自然背景的图像时, 模型拟合误差取较小的数值; 人造目标显然不具有自相似性, 在用分形模型拟合人造目标的图像时, 会产生较大的模型拟合误差. 这种模型拟合误差在数值上的差异, 是由于人造目标和自然背景在不同空间尺度几何结构上的固有差异造成的. 本文的工作就是建立在这种固有差异的基础之上, 根据它的相对数值差异检测自然背景中的人造目标.

基于上述固有差异所构成的检测自然背景中的人造目标的方法有三个优点: 利用空间

结构信息,自然环境条件和成像系统对信息的获取影响不大,可靠性大大提高;具有“鲁棒性”,即分维数在数值上的变化不影响判别结果;由于分形模型可以描述多种自然背景,因此本方法对多种自然背景环境和人造目标类型具有适应性。

2 分形特征的增强及图像检测

在获得了分形模型拟合误差分布图后,需要进行一定的处理来增强人造目标和自然背景在分形特征上的固有相对差异,使它们易于分离.本文采取模糊滤波^[5]的方法来达到上述目的.具体的过程如下:

对于一幅给定的图像 $g(i, j)$,若其最高灰度级为 N ,则对于图像中的具有灰度值 n 的像素,定义它的隶属度为

$$\mu(n) = n/L, \quad (11)$$

定义关于隶属函数的变换,即模糊滤波为

$$\mu^{(1)}(n) = \begin{cases} \mu^2(n)/\mu_c, & \mu(n) \leq \mu_c; \\ 1 - [1 - \mu(n)]^2/(1 - \mu_c), & \mu(n) > \mu_c; \end{cases} \quad (12)$$

式中 $\mu^{(1)}(n)$ 为增强后的隶属度, μ_c 为渡越点参数,取其为图像平均灰度对应的隶属度.经过式(12)的变换后,原图像中具有灰度值 n 的像素,在新的图像中具有灰度值为

$$n^{(1)} = \mu^{(1)}(n)n, \quad (13)$$

式(12)所表示的模糊滤波,使隶属度大于 μ_c 的像素的灰度值变高,而小于 μ_c 的像素的灰度值变低.式(12)可以迭代使用,迭代的次数一般为 3-4 次.

经过特征增强,在分形模型拟合误差图中,比较明显地呈现为强特征区和弱特征区,图像检测的任务就是将强特征区和弱特征区分离开来,进而对各个区域进行判别.本文中检测门限按最大类间方差的准则(即所谓 Otsu 方法)确定^[6].检测门限将特征增强后的分形模型拟合误差图中的像素点分为两类,一类对应于强特征区,另一类对应于弱特征区.另外,根据人造目标和自然背景的分形特征上的固有差异,确定对应于潜在人造目标的区域.进行检测的基本准则为:不是自然背景即为人造目标.由于人造目标不具有自相似性,其分形模型拟合误差高于自然背景的模式拟合误差.因此,若在分形模型拟合误差图中,某一区域高于检测门限,意味着在原始图像的对应区域中可能存在人造目标.

3 实验结果

利用上述基于分形特征的目标检测技术,处理在实际环境中采集的红外和可见光的海、陆、空图像数据,获得了大量的实验结果.部分红外图像的实验结果如图 1-3 所示,这些图中左边为原始图像和根据检测结果获得的瞄准波门,右边为检测结果.

实验参数:图像尺寸为 256×256 ;实际应用中,自动目标搜索主要针对远距离 10×10 以下的小目标,故选滑窗尺寸为 11×11 ;尺度 $M=5$;使用 486DX/33 计算机,处理时间约

14s. 观察结果:本文提出的处理方法可检出的目标尺寸一般在 3×3 至 20×20 之间,检出目标的图像对比度可达 6% 以下,图像中可以存在灰度和形状上能对目标检测产生干扰的自然物体(例如:目标为飞机,干扰物为天空中的云层和地背景中的自然物体).

处理结果表明:基于分形模型的人造目标检测技术是一种性能优良的目标检测技术,其特点是:全视场自动搜索,单帧图像即可给出检测结果;对红外和可见光图像,及海、陆、空不同自然背景和车、船、飞行器等不同类型目标,共用一套程序,无需调整处理参数;对人造目标的检测性能不受目标姿态、目标运动、目标灰度极性变化的影响;处理过程规则,可用现人硬件实时实现.

参考文献

- 1 Mandelbrot B B. *The fractal geometry of nature.*, San Francisco, CA:Freeman, 1982
- 2 Pentland A P. *IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intel.*, 1984, PAMI-6:661~674
- 3 Stein M C. *Visual Comm. and Image Proc. II*, 1987, SPIE-845:293~300
- 4 Peli T. *J. Opt. Soc. Am. A*, 1990, 7:1101~1112
- 5 郭桂蓉主编. *模糊模式识别论文集*, 长沙:国防科学技术大学, 1991
- 6 杨宜禾, 周维真. *成像跟踪技术导论*, 西安:西安电子科技大学, 1991

DETECTION OF MAN-MADE OBJECTS BY FRACTAL MODELS*

Zhao Yigong Zhu Hong Xiang Jianyong

(Department of Technical Physics, Xidian University, Xian, Shaanxi 710071, China)

Abstract A procedure of detecting man-made objects in natural background from the infrared and visible images was presented, in which the fractal structure was employed to model natural background, and the intrinsic difference in fractal characters between man-made objects and natural background was used to identify man-made objects. The methods of adaptive enhancement for fractal features and image detection were also discussed. Some experimental results for practical images were presented to show the effect of the procedure.

Key words fractal, target detection, image segmenting.

* The project supported by the National Natural Science Foundation of China and Defence Advanced Research Foundation