

数学形态学在红外多弱小目标提取中的应用

惠建江^{1,2} 刘朝晖¹ 刘文^{1,2}

(1 中国科学院西安光学精密机械研究所, 西安 710068)

(2 中国科学院研究生院, 北京 100039)

摘要 应用了高帽和低帽变换对图像进行对比度增强、采用基于流域变换的粘连目标分割的方法把图像中粘连目标分割开来, 进而采用了自适应的阈值把图像二值化。通过这一系列的处理后, 从红外图像中提取出了弱小目标信息。这种方法在红外弱小目标的判别中对目标的提取效果较佳, 也给后续处理提供了方便。

关键词 数学形态学; 红外图像; 多弱小目标

中图分类号 TP75 **文献标识码** A

0 引言

红外多弱小目标图像的处理是远程探测、精确制导、光电子等领域的重要研究方向。对于红外遥感图像和红外单目标图像的处理方法已经很多, 而且近似成熟; 但是对于红外多弱小目标的处理方法还处于摸索阶段^[1,6]。针对于这种多弱小目标的实验图像, 提出了基于数学形态学的处理方法。数学形态学的应用可以简化图像数据, 保持基本的形状特性, 并除去不相干的结构。

1 数学形态学基础

数学形态学(Mathematical Morphology)的基本思想是利用一个结构元素(structuring element)去探测一个图像, 收集图像信息, 用于图像的形状分析, 它与人的视觉特点有许多相似之处。图像处理中运用的最基本的运算是腐蚀和膨胀, 和由此组成的变换: 开、闭、击中击不中、Top-hat 等。

利用图像 B 对图像 A 作开运算的定义^[3]

$$A \cdot B = (A \ominus B) \oplus B \quad (1)$$

即先做腐蚀运算, 然后再做膨胀运算。图像 A 被结构元素 B 腐蚀定义为

$$A \ominus B = \{x; B + x \subset A\} \quad (2)$$

膨胀运算定义为

$$A \oplus B = \bigcup \{A + b; b \in B\} \quad (3)$$

在本文中, 图像 A 为红外多弱小目标图像, B 是结构元素。由式(2)可知, $A \ominus B$ 表示将 B 平移 x 仍包含在 A 中, 探测的目的就是标记出图像内部那些可以将结构元素填入(平移)位置; 由式(3)可知, $A \oplus B$ 利用结构元素对图像补集进行填充, 它对图像外部作滤波处理。

2 红外弱小目标图像的增强

本文分析的多、弱、小目标是空中下落的小目标, 在理论计算上是小于一个像元的, 在红外图像上是经过弥散以后的, 大于一个像元; 而且目标数量较多, 基本上无形状信息, 与周围背景相比没有突出的亮度特征。背景是大气、云层以及探测器视场内的景物, 一般情况下背景温度较低、亮度较弱, 有时也有较亮的云团, 但其内部分布较为均匀。大气的温度分布不均匀, 在红外图像上呈噪音点分布。还有红外热像仪附加的噪音, 以及其它信号的干扰等。这些都给目标的提取识别造成了一定的难度, 尤其是背景较亮时目标被淹没就更难提取。

目标像面的对比度的计算公式为

$$C = \frac{E_{\text{目}} - E_{\text{背}}}{E_{\text{背}}}$$

实验表明, 当对比度 $C \geq 0.083$ (调制对比度 ≥ 0.04) 时, 可以探测出目标, 也就是说可以提取、识别出目标来。文中的红外图像符合对比度要求。

在序列图像中, 背景随时间缓慢变化, 但可以认为在目标运动信息的较短时间内基本不变。如果将目标进入视场前一时刻的若干背景图像记录下来, 作为参考, 与含有目标的红外图像相减^[3], 就可以消除不均匀背景噪音的影响, 如图 1~3。

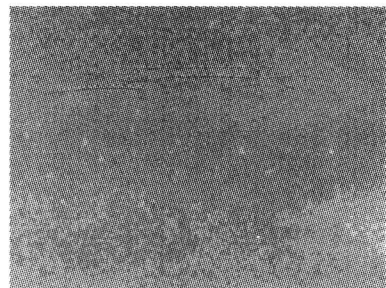


图 1 原始图像

Fig. 1 Original image

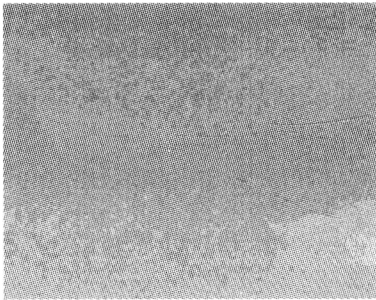


图 2 背景图像
Fig. 2 Background image

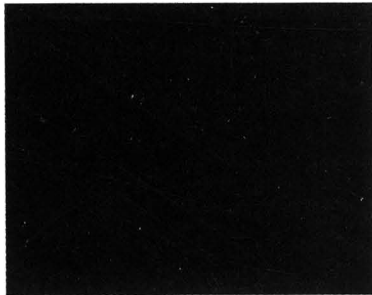


图 3 减背景图像
Fig. 3 Image of subtract background

目标图像减背景以后,由于残留噪音的影响,目标点与噪音点的像素值比较接近,因而需要对目标点与噪音点的对比度进行增强,使对比度调至最大^[4,5]. 进行这种对比度调节较好的方法就是综合使用高帽(tophat)变换和低帽(bothat)变换.

设经过减背景后的图像为 $F = \{x, f(x) | x \in P, P \subseteq E^2\}$, 其中 x 为图像平面的坐标点, $f(x)$ 为该坐标点的灰度值; 结构元素 $B = \{x, b(x) | x \in S, S \subseteq E^2\}$, $b(x)$ 为 x 点的结构函数值, 它是由空间形状和数值分布函数构成的, 它作为模板型的图像特征在空间呈现一定的曲面, 见图 4.

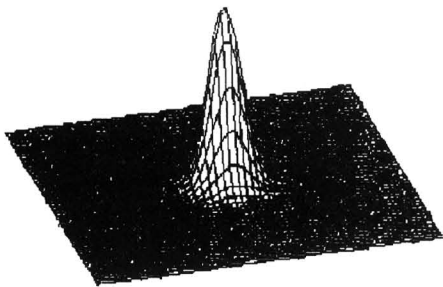


图 4 结构元素 B 所形成的曲面
Fig. 4 Curved plane formed by SE B

这两种变换都是基于图像形态操作的, 高帽变换实际上是图像开启(先对图像进行腐蚀然后膨胀)结果与原始图像之差, 见式(4), 体现了原始图像中的灰度峰值; 低帽变换是图像关闭(先对图像进行膨胀然后腐蚀)操作与原始图像之差, 见式(5), 体现了原始图像中的灰度谷值. 为了能够找到最准确的阈值进行分割, 首先将高帽变换结果与原始图像相加后再与低帽变换结果相减, 从而得到最大对比度的

图像. 由于这种处理会丢失目标信息, 所以用对比度增强后的图像与减背景后的图像相加, 既保证了图像对比度的增强, 又保证目标信息不丢失, 如图 5.

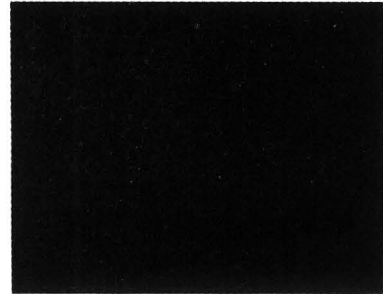


图 5 增强图像
Fig. 5 Enhancement of image

$$g_{\text{tophat}}(x, y) = g_{\text{open}}(x, y) - g_{\text{orig}}(x, y) \quad (4)$$

$$g_{\text{bothat}}(x, y) = g_{\text{close}}(x, y) - g_{\text{orig}}(x, y) \quad (5)$$

式中 $g(*)$ 为像素点的灰度值.

3 基于流域变换的粘连目标分割

流域分割算法是由 Beucher S 和 Lantuejoul 提出来的, 后来又得到进一步的改进. 在数学形态学中, 流域变换的方法能有效分割与标误具有连通或相似灰度的目标图像. 借助于流域分割算法进行处理, 可对目标粘连较严重的图像取得较好的分割结果. 它对目标的微弱边缘反应敏感, 但由于图像中噪音的影响, 也会引起过度分割的问题. 流域分割方法不仅可应用于二值图像, 也可应用于灰度图像.

从增强后的图像上, 可以看到, 有些目标是相互接触或重叠的, 因此采用了基于流域变换的图像分割方法, 目的是在保持目标完整的前提下, 分割连通区域. 此分割过程需用极限腐蚀的方法从而引入了距离函数的概念: 对于 A 内的任一点 x , 距离函数 $\text{dis}(x)$ 为从 x 到 A 的补集的距离. 用公式可表示为

$$\forall x \in A, \text{dis}(x) = \min\{n \in N; x \notin A \ominus nB\} \quad (6)$$

式中 N 为正整数集, $A \ominus nB$ 表示集合 A 被结构元素 B 腐蚀 n 次. 采用距离函数的极限腐蚀定义: 集合 A 的极限腐蚀 $Ult(A)$ 为距离函数相对极大值组成的集合. 设迭代 k 次以后达到极限腐蚀, 则 k 次为空迭代: $A_k = A \ominus kB$, 其中结构元素 B 为单位圆. 最终腐蚀 Y_i 的第一步是

$$U_k = (A_{k+1} \oplus (B)); A_k \quad (7)$$

最终腐蚀的第二步是从 A 的腐蚀中减去上述膨胀结果

$$Y_k = A_k - U_k \quad (8)$$

由于图像中有多个目标, 它们各自的 Y_k 的并集就得到了最终腐蚀的目标集合. 最终的腐蚀图像, 如图 6.

$$Y = \bigcup_{k=1, m} Y_k \quad (9)$$

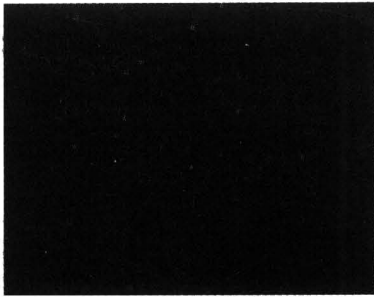


图6 粘连目标分割图
Fig.6 Segmentation image of conglutination

4 阈值化处理

经基于流域变换的图像分割以后,粘连的目标被分离开来.经阈值化处理后的图像 $g(x,y)$,如图7,定义为^[7,8]

$$g(x,y) = \begin{cases} 1, f(x,y) > T \\ 0, f(x,y) \leq T \end{cases} \quad (10)$$

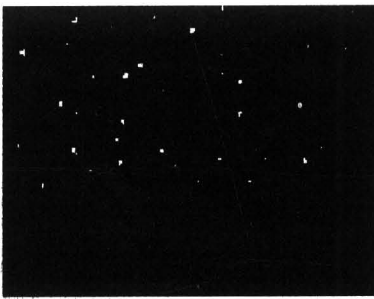


图7 阈值处理图像
Fig.7 Image of threshold processing

阈值选取的合适与否直接影响目标的虚警概率和检测概率.在理想情况下,减背景后的图像的噪音认识是白噪音,因此在恒虚警概率的情况下,采用以下的式子求阈值门限,其中 $P(x)$ 代表虚警概率, $\text{erf}(x)$ 为误差函数, TNR 是阈值信噪比, σ 是图像的方差.根据给定的恒虚警概率就可以求出 TNR 的值(表格1),阈值 $T = \sigma TNR$.对图6进行方差计算可得: $\sigma = 4.84444$.

$$P(x) = 0.5[1 - \text{erf}(TNR/\sqrt{2})] \quad (11)$$

$$\text{erf} = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x e^{-t^2} dt \quad (12)$$

$$TNR = T/\sigma \quad (13)$$

表1 恒虚警概率时的 TNR 和 T 的计算

$P(x)$	0.02	0.04	0.06	0.08	0.10
TNR	2.0537	1.7507	1.5548	1.4050	1.2816
T	9.9489	8.4811	7.3521	6.8064	6.2086

但是在实验图像被背景图像减之后,残留的噪音不仅是白噪音,所以采用自适应阈值 $T = E + \lambda\sigma$,其中 E 是图像的均值, $E = 8.8889$, λ 是自适应乘积因子,它随目标特征变化而变化,取值以提取的点目

标的数目为准则,太小则包含太多的高频噪音点,使得 $P(x)$ 增大,太大则目标丢失严重,这样检测概率就减小.因此在满足工程要求的前提下,权衡了虚警概率和检测概率之间的关系,取 $\lambda = 3.4$,此时 $P(x) = 0.06$.

5 结论

文中对红外弱多小目标图像采用了高帽和低帽变换、基于流域变换的粘连目标分割的方法进行了处理,并使用了自适应阈值分割的方法,把多目标从图像上分离出来,取的较佳的效果.实验图像是由 640×512 的红外热像仪记录,帧频为 60 Hz,数据位为 14 bit.如果选用合适的工作计算机,使用这种数学形态学的方法是完全可以满足工程中图像目标识别率和处理速度的要求.

但是这种方法仅能够找出目标的位置信息,要进一步分析目标的速度、航迹等信息,还需要借助其它(如弹道分析等)的手段;从处理过的图像可以看出,由于有少量的噪音点的灰度值比目标的灰度值要大,在单台红外图像上显示为假目标,提高了虚警率,这就需要通过两台或两台以上的红外热像仪交汇信息识别假目标,最终可以达到很高的识别率.

参考文献

- Gene K, Todd R. 3-D segmentation-based video processing. *IEEE-Systems and Computers*, 1997, 1(3~6):120~124
- 张幼文. 红外光学工程. 上海:科学技术出版社, 1982. 31~45
Zhang Y W. *Infrared Optical Engineering*. Shanghai: Science Technology Press, 1982. 31~45
- Schulze M A, John A. Morphological image processing techniques in thermo graphic imaging. *Biomedical Sciences Instrumentation*, 1993, 29(2~3):227~234
- 徐军, 向健华, 梁昌洪. 最大化背景模型用于检测红外图像中的弱小目标. *光子学报*, 2002, 31(12):1483~1486
Xu J, Xiang J H, Liang Ch H. *Acta Photonica Sinica*, 2002, 31(12):1483~1486
- 袁慧晶, 王涌天. 一种抗干扰的弱小目标检测方法. *光子学报*, 2004, 33(5):609~612
Yuan H J, Wang Y T. *Acta Photonica Sinica*, 2004, 33(5):609~612
- 廖斌, 杨卫平. 基于多帧移位叠加的红外小目标检测方法. *红外与激光工程*, 2002, 31(2):150~153
Liao B, Yang W P. *Infrared and Laser Engineering*, 2002, 31(2):150~153
- 章毓晋. 图像工程(上)—图像处理和分析. 北京:清华大学出版社, 1999. 31~45
Zhang Y J. *Image Engineering-Image Processing and*

Analysis. Beijing: Tsinghua University Press, 1999. 31~45

Zhang Y J. Image segmentation. Beijing: Science Press, 2001. 77~81

8 章毓晋. 图像分割. 北京: 科学出版社, 2001. 77~81

Application of Mathematical Morphology on Infrared Image of Multi-dim-small Target

Hui Jianjiang^{1,2}, Liu Zhaohui¹, Liu Wen^{1,2}

¹ Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, CAS, Xi'an 710068

(². Graduate School of the Chinese Academy Sciences, Beijing 100039)

Received date: 2005-10-20

Abstract Through the tophat and bothat of mathematical morphology in image enhancement, the targets' cluster was divided into single target by method of watershed. And automatic threshold selection was applied in segmentation of the image. The experiments results supported the method.

Keywords Mathematical morphology; Infrared image; Dim-small target



Hui Jianjiang was born in 1979 and graduated from Xidian University in 2002. Now he is working towards the M. S. degree in Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics. His research interest is in infrared image processing.