

文章编号: 1007-4619(2006)04-0449-07

基于多源卫星图像融合的水坝检测方法的研究

邱丹丹, 马洪超, 杨 耘, 贾 鹏

(武汉大学 遥感信息工程学院, 湖北 武汉 430079)

摘 要: 本文提出了一种基于多源卫星图像融合的水坝检测方法,该方法在特征级融合的模式下,利用多源卫星图像特征信息互补的优势,先后提取多个卫星图像中目标的特征信息,再通过多传感器数据融合方法中的逻辑模板法对特征进行融合,得到系统的目标结果输出。试验结果显示,该算法能在大幅复杂背景下有效地对水坝进行检测并定位,并减少了单源卫星图像进行目标检测的错判、误判率。整个算法能完全实现自动检测,可达到预想的目的。

关键词: 水坝; 图像融合; 多源; 检测

中图分类号: TP79/TP751.1 **文献标识码:** A

A Study of Dam Detection Based on Multi-source Satellite Images Fusion

QIU Dan-dan, MA Hong-chao, YANG Yun, JIA Peng

(School of Remote Sensing and Information Engineering, Wuhan University, Hubei Wuhan 430079, China)

Abstract A method of dam detection based on multi-source satellite images fusion is brought forward. Under the pattern of feature level fusion, this approach utilizes the advantage which adopts commutative complementarily characters of multi-source remote sensing. First, extra the features in multi-source satellite images in turn. Then these features are fused by logic template of multi-sensor fusion to get the target detection output of the system. The result of the test proves that the approach can effectively detect and locate the dam in the large complex remote sensing image and reduce the miscarriage of justice and mistake in only one satellite image. The whole algorithm can work automatically, achieving the anticipating aim.

Key words dam; image fusion; multi-source; detection

1 引 言

多源遥感图像融合技术在目标检测中的应用已日益广泛^[1],其现阶段的主要应用是确定图像中是否存在目标,给其一个合理的解释,即判断目标的位置。

水坝是重要的人工建筑,对水坝检测的研究有利于进一步对水坝及其电站进行检测与监测,所以水坝检测的研究在遥感影像自动目标识别上有比较重要的意义。目前国内外对水坝检测的研究文献还不多,根据笔者的研究,本文提出了一个基于多源卫星图像融合的水坝检测方法,利用多源卫星图像中

目标特征上的互补性,采用特征级融合的方法,可以较准确的检测目标。试验证明,本文的方法能有效地利用水坝的多源特征的信息,在复杂背景下的大幅影像中对水坝进行自动检测并定位。

2 方法描述

本文所采用的卫星图像分别为 Landsat TM 多光谱图像和 ERS 雷达图像,因为这两种不同性质且各具特色的图像可以更好的体现目标特征上的互补性。经过分析,水坝在多光谱图像和雷达图像中表现的特征分别如下:

收稿日期: 2005-05-29; 修订日期: 2005-08-30

基金项目: 国家 863 计划 (编号: 2003AA135010) 资助

作者简介: 邱丹丹 (1981—), 女, 武汉大学模式识别与智能系统专业硕士研究生, 已发表论文 2 篇。研究方向为模式识别与图像处理。

E-mail: dada_qdd@163.com.

(1)多光谱图像中,图像信息多,水坝的自身和上下文信息较丰富,主要体现在以下三点:①水坝,特别是大型水坝,多修建在深山峡谷、大河大江上^[2];②在红外波段上,河流表现为暗区,桥梁、陆地灰度值相对较高。利用此上下文信息,可以在TM图像中提取水坝的有效区域—河流区域;③水坝的外形轮廓特征比较清晰。

(2)SAR成像机理与光学图像不同,存在边缘模糊、大量乘性斑噪(Speckle)等缺点,但其穿透能力可以克服云层遮挡和伪装,且水坝在图像中的亮度特征较明显。

根据以上特征,本文提出如图1所示的特征级融合检测水坝的算法流程。

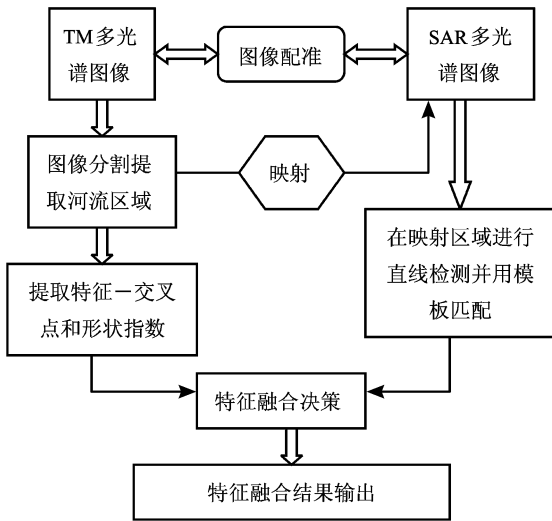


图1 水坝检测流程图

Fig 1 Flow chart of dam recognition

2.1 图像配准

要利用多源遥感图像进行目标检测,首先要对图像进行配准,本文利用基于控制点的多项式校正来进行配准。根据分辨率高的图像向分辨率低的图像进行配准的原则,以多光谱TM影像为参考影像,雷达图像为被配准影像,配准完后的图像均为30m分辨率。由于本文的算法是基于多传感器特征级的数据融合检测,对于配准精度要求不是太高,偏差控制在3个像素以内。

2.2 图像分割提取水域

由于大幅影像的数据量很大,为了提高运算速度,同时为了更准确地检测出水坝目标,限制后续处理的范围,需先提取水坝所在的有效区域—河流区

域。由于水体在TM图像中的灰度值较其他地物低很多,在TM图像中的特征比较明显,而在雷达图像中由于受噪声影响很大,边界不明显,不能清楚地与其他地物区别开,所以本文采用在TM图像中的直方图单阈值分割的方法来分割出水体,此方法快速且有效。

水体在比较清晰的如第3、4、5和7波段的图像中,存在这样的现象:组成水体的像素在灰度直方图的一端形成一个较窄的波峰,同时也形成了灰度直方图的第一个波谷。对某一波段的图像,通常取第5波段,取该波谷的值作为二值化的阈值就可以很好地实现河流和陆地的分离^[3]。本文将其波谷值记为阈值T再根据T值对第5波段的图像进行二值化,即可得到河流区域的二值图。

在TM第5波段的图像中,水坝和桥梁等河流上建筑物的灰度比河流高,所以单阈值分割所提取出的河流区域被这些河上建筑物隔断。为了得到连通的河流区域,需要对上步的二值图像进行后处理,本文所使用的方法为通过形态学的膨胀、腐蚀来处理,修复河流的轮廓并消除河流和陆地边界的毛刺^[4]。最后再通过区域增长滤除噪声,得到主河流区域。结果显示该方法较为简单有效。

提取出完整河流区域后,将此二值图像的河流区域映射到已配准好的雷达图像上,即可得到雷达图像上的目标有效区域。

2.3 特征提取

提取有效区域后,接着分别在不同源图像中提取目标特征。在本文的研究中,特征提取不是简单的提取特征,还融合了搜索、匹配策略,为最后的特征融合创造了有利条件,也简化了运算。

2.3.1 交叉点提取

由于水坝等水上建筑物大都是垂直于河流流向的,所以沿着河流轮廓与河流流向有交叉点的位置可视为水坝的一大特征。考虑到河流边缘的不规则性和噪声的影响导致轮廓上小突起与凹状不规则边缘也会形成交叉点,所以在提取交叉点时,还需对交叉点进行特征滤波。

提取交叉点的具体步骤是:首先,对上步的二值化图像中在不用形态学连通的情况下,先直接提取轮廓,因为这时在河流上有水坝处是断开的,可以为下一步提取交叉点做准备。本文采用Rober算子提取河流边界轮廓。由于Rober算子在噪声小的图像中有定位较准的特点,所以此处用其提取边缘比较合适。接着,在轮廓图中提取目标的交叉点特征,本

文提取交叉点的算法如下:

(1)对于在边缘图像中的每个交叉点,取以该交叉点为中心的半径为 R 的圆,获得一组位于圆上的参考点点集(图 2),这些圆周上的点(以下称为圆周点)是假设的交叉点在半径线上的极值点。

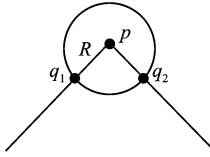


图 2 点 p 圆周点图

Fig 2 Circumferential anchor points according to point p

(2)这组圆周点用来决定当前假设的交叉点是否可以接受。①交叉点到圆周点要有连续通路,否则,舍弃该点;②这个交叉点半径线的长度定义为参考点集到交叉点的平方距离和,并用这个线段的长度进行规则化。

(3)如果这个交叉点半径线的长度小于预先给定的阈值,则丢弃,否则,该点的圆周点作为潜在交叉点的一个分支。

(4)如果分支交叉点的数量小于 2,那么该处没有交叉点。否则,记录可接受交叉点的角度和点集中最小的长度。特别是在有两个交叉点时,还要检查角度是否在范围内,否则有可能是简单的直线,若如此,则去掉该点。

(5)记录每个潜在交叉点,并扫描下一个边缘点,返回到第一步,直到扫描完边缘。

然后,对交叉点进行特征滤波。本文采用的特征滤波方法是仿生目标搜索策略——BOES策略^[5]中的算法思想,即①要模仿生物视觉的定向主动性,具有强烈的目的性和特征选择性;②抓住模式的模式特征,设计特征滤波器对图像滤波,屏蔽背景干扰信息。

对于水坝检测,需要针对水坝的局部模式特征,设计特征滤波器。河流上大型建筑物有交叉点呈对称性,交叉角度在 $50^\circ-100^\circ$ 间,分支交叉点数为 2—3 点,交叉点半径较大等特点。通过这些特征,对所提交叉点进行滤波。试验证明该方法可以较好的检测出水坝交叉点,且屏蔽掉了一部分其他交叉点。

2.3.2 形状特征

在 TM 图像中,由于河流上水坝与河流有一定的灰度差,水坝的轮廓形状清晰可见。因此水坝轮廓形状也是有效的特征之一。在遥感图像中,水坝

最突出的就是挡水建筑物和泄水建筑物,又由于这些建筑物呈垂直排列,所以一般水坝轮廓表现为 π 型或 T 型。由于本文的研究对象为中国水坝,所以主要以该类型的水坝作为试验对象。

首先通过差影法,将形态学处理前后的图像进行相减处理,可得到近似整体的目标。目标被分割出来以后,计算其面积特征和形状特征。

水坝是较桥梁更大的水上建筑物,其面积较大。而其形状也非简单的矩形,通常呈 π 型或 T 型。一般来讲,目标的形状越复杂,则相同面积大小下,其边缘的长度越长,因此可以用目标的周长来检测形状复杂度。考虑到面积大的目标,即使形状简单,其周长也很大;而面积小的目标,即使形状复杂,其周长仍然小,因此,这里采用一种基于面积的归一化形状度:

$$\text{形状复杂度} = \frac{\text{周长}^2}{\text{面积}}$$

其中,周长为所得区域的边缘长度。该形状指数在一定程度上反映了区域的紧凑性,它没有量纲,对尺度、旋转变换不敏感。因此形状复杂度能较好地区分不同方位的目标。通过形状特征可以将水坝和其他水上建筑物(主要为桥梁)区分开来。

2.3.3 直线提取

在雷达图像中,水坝呈明显的亮点,河流则呈黑色,水坝线特征明显,可用来提取直线特征。通过直线提取不仅得到水坝的边缘直线,还得到河流上的桥梁的边缘直线以及一些噪声直线。孤立的直线特征无论在长度还是角度上都不能体现出水坝的特征,最能体现其特征的是水坝的直线组合特征,所以本文通过建立水坝的模板,采用模板匹配的方法再对直线进行特征选择。

鉴于雷达图像的噪声较大,以河流区域作为限制区域是很有必要的。本文在河流区域进行直线的提取,所采样的直线提取方法为相位编组算法。相位编组算法的特点是:把灰度变化的相位作为考虑的第一要素;在对边缘作局部决策之前,先作支持边缘上下文关系的全局组织,结果可以从复杂的图像中抽取相当低对比度的直线^[6]。在此基础上,本文又采用了对线支持区的点集合在极坐标内进行拟合形成直线的方法,可提高计算速度且对效果没太大影响。具体方法是将线支持区的点集合映射到 (r, θ) 极坐标中,并用一个计数累加器计算每个量化值在同一 (r, θ) 值上的大小,同时统计直线支持区内点集合坐标值的最大、最小值。此时便可得到每条直线的属性:长度、方向、起始位置。在修改后的相位编组方法中,拟合的

直线能有效地还原原图像中的直线信息,还可通过控制直线长度的大小屏蔽不满足条件的直线。

通过上文对水坝形状的分析,本文为水坝建立的模板为近 π 形模板和 T 型两个模板;模板匹配算法为改进的 SSDA 模板匹配算法^[7]。其基本思想是将匹配过程分为两步进行,第一步为粗匹配,第二步为精匹配,并根据匹配的结果自适应的调节门限值,这样的好处是大大提高了匹配的速度。在匹配标准的设定中,为了能使图像在平移、旋转、缩放等变换下对匹配的结果没有影响,本文采样匹配的标准是图像不变矩,计算公式如下:

$$\phi = (\eta_{20} - \eta_{02})^2 + 4\eta_{11}^2$$

其中,

$$\eta_{pq} = \eta_{pq} / \mu_{00}^r$$

$$\mu_{pq} = \sum_x \sum_y (x - \bar{x})^p (y - \bar{y})^q f(x, y)$$

$$\bar{x} = \frac{\sum_x \sum_y x f(x, y)}{\sum_x \sum_y f(x, y)}$$

$$\bar{y} = \frac{\sum_x \sum_y y f(x, y)}{\sum_x \sum_y f(x, y)}$$

η_{pq} 为 (p+q)规范化中心矩, μ_{pq} 为 (p+q)阶中心矩, \bar{x} 和 \bar{y} 是物体质量中心的坐标, $f(x, y)$ 是图像的灰度值。

通过图像不变矩求出实测图像和模板的差值 $dis(x_p, y_i)$,并遍历图像,找到差值中的若干个最小值及其出现的位置,这些位置即为此幅图像中的相关匹配点。

2.4 对特征进行融合决策

基于认识模型的多传感器融合 (MSF)方法为试图模仿人类从其多传感器(眼、耳、鼻、手等)数据辨别实体的识别过程模型,其中有模糊集合理论、逻辑

模板法以及基于知识或专家系统等。本文的水坝检测背景比较单一,噪声较少,且提取的特征较精确,故采用较精确的逻辑模板方法进行决策。

逻辑模板是一种匹配概念,即将一个预先确定的模式(或模板)与观测数据进行匹配,确定条件是否满足,从而进行推理。基本的模板算法可用来对多传感器的观测数据与预先规定的条件进行匹配,以确定这个观测是否能提供检测某个实体的证据。模板处理的输入是一个或多个观测数据,其中可包含时间周期中的有参或无参数据,因此瞬间变化可以包含在这些结构中。输出是关于观测是否匹配于一个预定模板的说明,也可以包含对象间联系的可信度或概率^[8]。

根据统计分析,定义模板算子 $C_{ym}(S)$ 如下:

$$C_{ym}(S) = \{ I_{m \times n}(x, y) \mid \text{Deg}(I_{m \times n}(x, y) \cap S) > \text{ThreshCondition} \}$$

定义式中 ThreshCondition 不是一个单纯的阈值,而是其满足一组位置和度的条件。其中,度的条件是通过统计一定数量的数据而得到的经验值,并根据这些数据建立小型数据库;位置比选条件则避免了几个候选区聚集在非常临近的地方,防止造成错误的引导。其模板条件如下:

- (1)满足有对称平行的交叉点;
- (2)满足形状指数大于某个阈值;
- (3)满足建立的直线组合模板的特征。

满足条件组的区域为得到的区域,即为检测到的水坝区域。

在本文的试验中,为了对用多源图像与单源图像检测水坝的准确性进行比较,又单独用其单源图像数据的特征分别建立特征模板算子。即将上述特征集合 1分为两组,其一为条件 1、2为一组,即为 TM 单源图像检测条件,其二为条件 3 一组为 SAR 单源图像检测条件,如图 3所示。

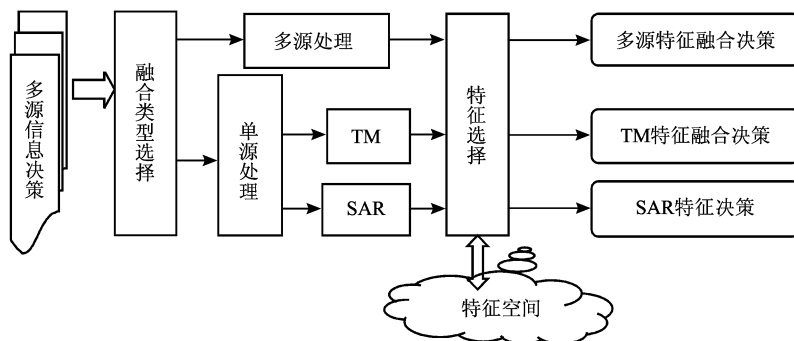


图 3 对特征进行融合决策

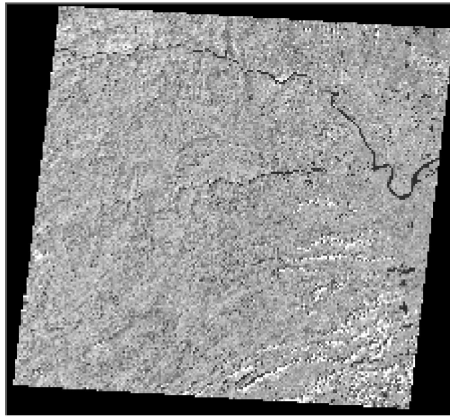
Fig 3 Fusion decision of feature

3 实验结果

笔者在基于 Windows2000 的平台上用 VC++ 实现了本文提出的算法。实验数据采用长江三峡流域

的多光谱图像和雷达图像进行实验。其中多光谱图像为 6507×7371 大小的一景 TM 图像,雷达图像为 8200×8000 的 ERS-2 图像(图 4)。

图 5 中为对原图像的部分试验结果图。其中图 5(a)为通过配准并自动裁减后的 TM 图像上的河流



(a)



(b)

图 4 TM 和 SAR 试验图像

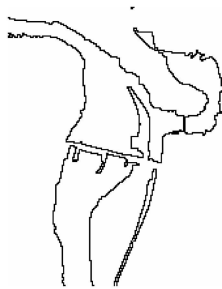
(a) 原 TM 第 5 波段图像; (b) 原 ERS 雷达图像

Fig 4 TM and SAR image

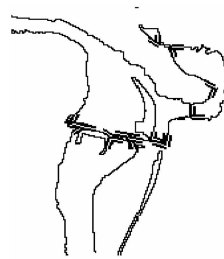
(a) The fifth band image of TM; (b) ERS radar image



(a)



(b)



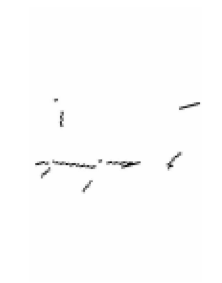
(c)



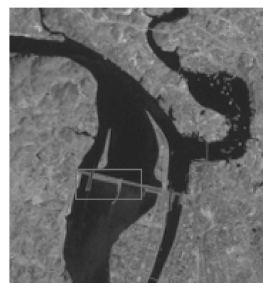
(d)



(e)



(f)



(g)



(h)

图 5 目标检测部分试验图

(a) TM 河流分割图; (b) 水坝区域轮廓图切片; (c) 水坝交叉点特征图切片; (d) 水坝形状特征图切片; (e) SAR 中水坝图切片; (f) SAR 中直线特征图切片; (g) TM 结果图切片; (h) SAR 结果图切片

Fig 5 Part of object detection experiment results
(a) River image of TM segmented; (b) Skeleton of dam part (c) Crossing of dam part (d) Shape of dam part (e) Dam part of ERS; (f) Line of dam part in ERS; (g) Part of TM result (h) Part of ERS result

分割二值化结果图。图 5(b)为提取河流的轮廓图切片,图 5(c)为检测河流轮廓交叉点结果图切片,图 5(d)为提取的水坝形状轮廓图切片,图 5(e)为对应雷达图形中的水坝图切片,图 5(f)为雷达中直线检测结果图切片,图 5(g)为 TM 中结果图切片,图 5(h)为雷达图像结果图切片。由于试验数据有限,为了更好的证明方法的有效性,本文对原数据进行了加工模拟,如图 6 中 (a)、(e)分别为拟造的 TM 和 SAR 中第二个水坝的切片图,通过对二组数据的试验来检验本文算法的有效性。

图 6 列出了部分模拟的水坝数据的试验结果图,其中图 6(b), (c), (d), (f)分别为水坝的区域河段的轮廓切片,水坝的交叉点图切片,水坝的形状轮廓图和水坝在雷达图像中的直线检测图切片。

同时表 1 列出了两组图像的检测结果。

从实验结果可以证明,通过本文的多源特征级融合方法检测水坝能有效的检测出水坝的数量和大致位置,并且提高了单源特征检测目标的可信度,提高了正确率,也即降低了误判和错判率。本文的算法能较有效的对水坝进行检测和定位,达到预想的目的。

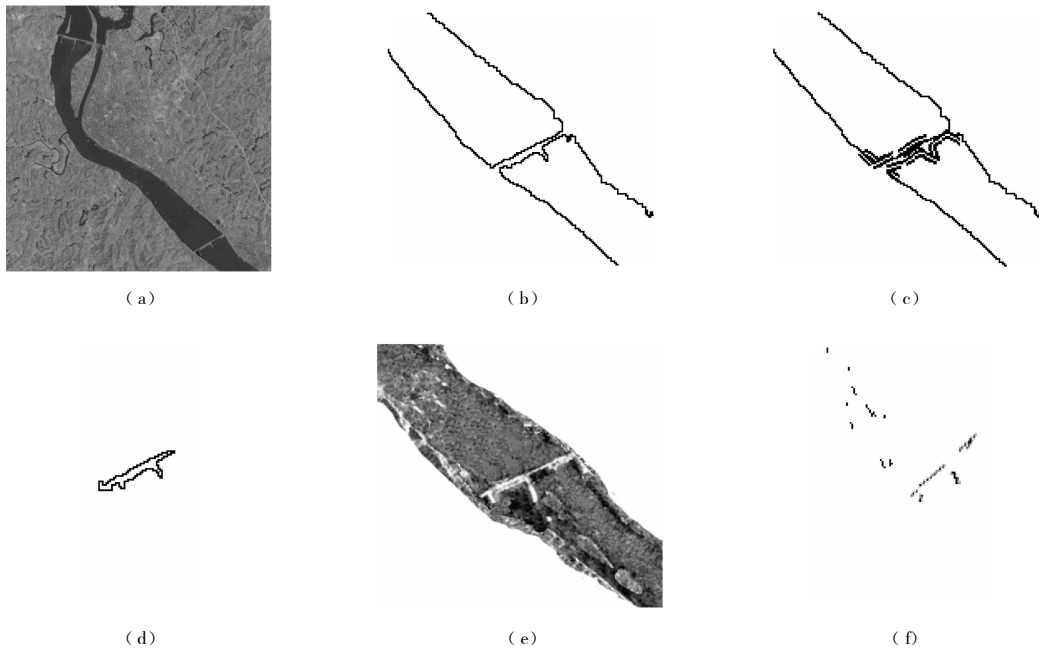


图 6 模拟图像目标检测部分试验图

(a)模拟的两个水坝图切片;(b)第二个水坝轮廓切片;(c)第二个水坝交叉点特征图切片;
(d)第二个水坝形状特征图切片;(e)SAR 中第二个水坝图切片;(f)SAR 图像直线特征图切片

Fig 6 Part of object detection experiment results in simulated image

(a)Stimulant image of two dams (b)Second skeleton of dam part (c)Second crossing of dam part
(d)Second shape of dam part (e)Second dam part of ERS; (f)Line of dam part in ERS

表 1 多源图像特征级融合检测结果

Table 1 Results of Character Fusion Detection

图像序号	实际结果 (个数)	单源图像检测结果		单源检测正确率 /%		两源影像融合后 检测结果(个数)	两源融合检测 正确率 /%
		TM(个数)	SAR(个数)	TM	SAR		
1(原始图像)	1	2	4	50	25	1	100
2(模拟图像)	2	3	5	66.7	40	2	100

的特征信息,以特征级融合结构进行融合检测是可行的。从理论和试验结果可以看出,本文算法有如下优点:

(1)由于是基于特征级融合的方法,本文的方

4 结束语

在水坝检测中,利用多源卫星图像信息源提供

法对图像配准精度要求不太高;

(2)河流二值化的提取及其轮廓修复有效地提取了目标背景,加快了运算速度;

(3)分别在两源遥感影像上提取了目标特征,并利用特征级融合对目标进行检测,提高了检测正确率和水坝目标检测能力。

当然,融合检测也存在一些迫切需要解决的问题,如单源检测模型的确定问题,它需要大量目标样本的先验信息来对它进行构造、训练和验证;以及如何采用更多源影像进行目标检测等均有待于研究。

参 考 文 献 (References)

- [1] Zhu Y C, Li W F. The Improved Method of Wavelet Energy [J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2005, 27 (1): 70—74 [朱亚超,李文锋.改进型小波能量法的图像融合评价 [J].武汉理工大学学报,2005,27(1):70—74]
- [2] Liu Q Z. Dam (Third Edition) [M]. Beijing: Water Conservancy & Water and Electricity of China Press, 1997. [刘启钊.水坝(第三版) [M].北京:中国水利水电出版社,1997.]
- [3] Wu H, Liu Z K, Zhang R. A Study of Bridge Recognition from Landsat TM Images [J]. Journal of Remote Sensing, 2003, 7 (6): 478—484. [吴皓,刘政凯,张荣. TM 图像中桥梁目标识别方法的研究 [J].遥感学报,2003,7(6):478—484.]
- [4] Liu W, Jiang Y M, Lei L et al. A Method of Bridge Recognition Based on Multi-source Remote Sensing Image Fusion [J]. Signal Processing, 2004, 20 (4): 427—430. [刘伟,蒋咏梅,雷琳等.一种基于多源遥感图像融合的桥梁目标识别方法 [J].信号处理,2004,20(4):427—430.]
- [5] Huang K W, Zhao Y N, Sun F J et al. An Efficient Object Exploring Strategy and Its Application in the Image Analysis [J]. Journal of Image and Graphics, 1999, 4 (12): 1038—1043. [黄可为,赵雁南,孙发杰等.一种高效目标搜索方法及其在图像分析中的应用 [J].中国图象图形学报,1999,4(12):1038—1043.]
- [6] Wang R S. Image Understand [M]. Changsha: Nation University of Defense Technology Press, 1994. [王润生.图像理解 [M].长沙:国防科技大学出版社,1994.]
- [7] Mi C W, Liu X L, Xu M Y. An Advanced Algorithm Based on SSDA [J]. Journal of Ball Arrow and Control and Guide, 2004, 24 (1): 85—87. [米长伟,刘晓利,徐明友.基于 SSDA 的改进算法 [J].弹箭与制导学报,2004,24(1):85—87.]
- [8] Liu T M, Xia Z X, Xie H C. Data Fusion Techniques and Its Applications [M]. Beijing: National Defence Industry Spress, 1998. [刘同明,夏祖勋,解红成.数据融合技术及其应用 [M].北京:国防工业出版社,1998.]