

基于知识的中高分辨率光学卫星遥感影像桥梁目标识别研究*

吴 樊^① 王 超^② 张 红^{③①} 张 波^① 张维胜^①

^①(中国科学院遥感应用研究所遥感科学国家重点实验室 北京 100101)

^②(中国科学院中国遥感卫星地面站 北京 100086)

^③(北京师范大学地理学与遥感科学学院遥感科学国家重点实验室 北京 100875)

摘 要 桥梁是重要的人工建筑。对桥梁进行识别研究,在民用上和军事上都具有很重要的意义。该文提出一套针对中高分辨率光学卫星遥感图像上大中型桥梁的检测和识别的流程。首先根据光学卫星图像特点,运用分割和形态学算子提取河流;沿着河流中心线对桥梁进行检测;经过边缘提取、线段跟踪、直线拟合、边线配对等处理后对检测出的桥梁进行定位,并获取长度、宽度、方位等桥梁参数。以 SPOT-5 5m 全色波段图像进行验证,证明本文算法流程对河流上桥梁目标识别是有效的。

关键词 卫星影像,桥梁目标识别,形态学,直线拟合

中图分类号: TP751.2

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2006)04-0587-05

Knowledge-Based Bridge Recognition in High Resolution Optical Imagery

Wu Fan^① Wang Chao^② Zhang Hong^{③①} Zhang Bo^① Zhang Wei-sheng^①

^①(State Key Laboratory of Remote Sensing Science, Institute of Remote Sensing Applications, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China)

^②(China Remote Sensing Satellite Ground Station, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100086, China)

^③(State Key Laboratory of Remote Sensing Science, College of Geography and Remote Sensing, Beijing Normal University, Beijing 100875, China)

Abstract Bridge detection in remote sensing imagery has been a topic of considerable interest. In this paper, a new flow of bridge recognition in high-resolution optical imagery is proposed. Based on the prior knowledge of bridge, potential river regions are segmented and thus the centerline of rivers can be extracted after morphology erosion and dilation operations. Then the bridge detector is implemented along the river centerline in ROI regions. After that, the detected bridges are identified by using two knowledge rules and the characteristics such as location, length, width and orientation of detected bridges can be obtained. Experiments are executed on the SPOT-5 5m-resolution panchromatic imagery, and the results are showing to confirm the validity of the proposed method.

Key words Satellite image, Bridge recognition, Morphology, Straight line fitting

1 引言

信息提取是当前遥感应用研究的热点课题,桥梁作为重要的人工建筑,其信息在民用和军事上都是相当关注的。由下而上的数据驱动型和由上而下的知识驱动型是目标识别算法所常用的两种策略^[1]。数据驱动型不考虑目标的类型,直接对图像数据进行分割、提取特征等处理。虽然其适用面广,但是处理过程缺乏知识的指导,盲目性大,算法复杂,

效率不高。基于知识的目标识别,在识别之前需要根据目标的模型,提出目标在图像中存在的可能特征以及目标与周围环境的关系,根据这些知识对目标进行有效的分割、特征提取等处理。由于有知识规则的限定,处理过程针对性强,因而算法的效率也高。

现阶段桥梁识别一般采用基于知识的算法,通过分割直接获取^[1-3]或由河流间接完成对桥梁的检测^[4-7]。但多数文献都关注于某一算法,集中于对桥梁的检测阶段,较少从整个桥梁的识别流程进行阐述。本文采用基于知识的桥梁识别方法,针对中高分辨率光学卫星遥感图像提出一套对河流上大中型桥梁进行检测、识别的完整算法流程。首先根据知识规则提取河流区域,将桥梁识别的范围限定于河流区域;运用

2004-10-18 收到, 2005-03-07 改回

国家重点基础研究发展规划项目(2001CB309406), 中国科学院知识创新工程重要方向项目(KZCX2-309)和国家自然科学基金(40071062)资助课题

形态学算子进行河流断点的连接, 噪声的剔除, 并提取河流中心线; 沿中心线对桥梁进行检测, 获取桥梁的边缘线, 进行配对、拟合; 进而对桥梁进行定位, 根据图像分辨率信息获取桥梁各参数, 达到桥梁识别的目的。以SPOT-5 5m全色影像为例进行了实验分析, 结果表明运用本文算法流程检测率达到90%以上, 并能较准确地获取桥梁的各参数。

2 桥梁识别的知识规则

桥梁一般是连接因水系而隔断的两块陆地之间的纽带, 因而桥梁往往位于河流之上。桥梁在高分辨率光学卫星图像上都表现为长矩形, 并有两边平行边。由于光学图像都是采用中心投影, 在成像时卫星传感器处于被测地区的正上方, 传感器与星下点之间的连线(可以看作是地球表面的法线)往往和太阳光线入射角呈一定交角。通常情况, 河流表面产生镜面反射, 所以其反射能量只有很少的部分返回传感器, 因而河流等水体范围在遥感图像上表现是暗区。而河流附近的居民地以及河流上的桥梁等区域和地物, 由于地物类型多样且外表复杂而产生漫反射, 在图像上信号相对于河流要强得多。通过以上分析得到如下桥梁识别的知识:(1)桥梁几何外形一般是长矩形, 有一对与河流边缘相交的平行边, 但不一定垂直河流边缘。(2)在图像上河流被桥梁分割成若干段。(3)河流在光学图像上常表现为暗区, 并且内部灰度值比较均匀。而桥梁与河流附近的居民区灰度值相近, 与河流内部的灰度有较大反差。(4)桥梁一般位于河流之上。(5)桥梁两端与等宽度的道路相连。其中(1)和(2)是桥梁的几何结构特性;(3)是桥梁在遥感图像中辐射方面的特性;(4)和(5)是桥梁功能方面的知识。根据这些知识规则, 可以有针对性地选取算法, 制定一套卫星遥感图像桥梁识别的流程。本文方法从对河流的提取入手, 将桥梁的检测范围缩小到河流区, 然后再进行桥梁检测, 这样大大的提高了检测效率, 也减少了大范围检测而带来的误检率。

3 河流区域提取

3.1 河流水体的初步分割

河流区域的提取, 是整个识别流程至关重要的一步。河流区域能否很好地分割出将会影响桥梁的提取和识别。常用的分割方法有基于直方图特性的阈值分割, 基于边缘检测的分割等。经过对SPOT全色图像河流区域的分析发现, 其统计直方图有明显的双峰形状。这说明图像符合这样的模型, 即图像由具有单峰灰度分布的目标和背景组成, 在目标或背景内部的相邻像素间灰度值是高度相关的, 但在目标和背景交界处的像素在灰度上有很大的差别^[8]。这也说明图像中目标和背景的灰度均值相差较大, 而且各自的方差也保持足够的小。从对图像的目视观察, 桥梁和周边环境的关系符合这样的规律。对于这类图像采用阈值方法可以将目标和背景较好地分离^[8]。

对于具有双峰值直方图的图像来说, 最佳阈值一般取直方图两峰之间的谷所对应的灰度值。如果将直方图($h(z)$)的包络看作一条曲线, 则求直方图的谷值可转化成求曲线的极小值点。极小值点必须满足:

$$\frac{\partial h}{\partial z} = 0 \quad \text{且} \quad \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} = 0 \quad (1)$$

在实际图像中, 包含目标图像的区域面积不会很大而且可能会有噪声, 因而直方图也会有噪声。可以通过卷积运算对直方图进行平滑以消除噪声, 具体过程见文献[6]。设求得的阈值为 T 。 $f(i, j)$ 为原图像, 则分割后结果为

$$g(i, j) = \begin{cases} 1, & f(i, j) \leq T, \text{ 目标区} \\ 0, & f(i, j) > T, \text{ 非目标区} \end{cases} \quad (2)$$

经过直方图阈值分割后, 将较好地得到水体范围。

3.2 河流范围的获取

水体初步分割后, 图像上仍有部分离散的噪声。由于有的噪声面积还比较大, 占十几个甚至几十个像素的范围(但一般比水体区要小), 此时若用形态学算子腐蚀和膨胀的方法来剔除, 将会对水体区域形状保持有所影响。因此本文通过对每一初步确定的目标区进行连通性标记, 按标记值求得各标记区的面积, 并设定一个面积阈值, 小于此阈值的区域将被剔除。

连通区域标记采用像素标记法^[8]。考虑8连通的情况, 连通区域可以这样定义: 在图像中, 假设目标像素周围的8个像素中有一点 P 的灰度值和该像素的灰度相同, 则称目标像素和 P 具有连通性。搜索规则从图像的左上点出发, 按从左到右, 从上到下的顺序进行扫描, 对图像每个像素的8连通区域进行判断标记。假设目标区的值为1, 背景区为0。标记步骤为:

(1) 对起始点进行标记, 若其为目标点(即值为1)则标记, 否则做下一步。

(2) 对第1行像素进行标记。若当前像素的灰度值与前一像素的灰度值相同则赋予该像素和前一像素相同的标记值, 否则给其新的标记值。

(3) 对其余的像素进行标记。每个像素进行左、左上、上、右上4个方向的判断(注意每一行第1个像素只能做上和右上两个方向的判断)。假如当前像素值为0, 则移到下一个像素位置。假如当前像素值为1, 被检测的邻近像素都为0, 则赋予当前像素一个新的标记。如果只有1个像素值为1, 则把该像素的标记值赋给当前像素。若有2个或多个像素值为1, 并且标记值不唯一的话, 则将其中一个标记赋给当前像素并做记号表明这几个标记是等价的。扫描结束后将所有等价的标记归入等价组, 对每个等价组统一为1个标记值。

(4) 进行第2次扫描, 将每个标记用最后统一后的标记值进行标记。

对目标区进行标记后, 可以根据标记值求得每个目标区的面积, 根据经验设定一个面积阈值(本文取参考值100), 并

根据面积阈值剔除小面积的假目标。同理对于水体目标区域内部由于船等漂浮物的存在经分割后而产生噪声, 也可经过反色后通过连通区标记进行去除。

经过处理后得到被桥梁分割成的若干个河流段即水体二值图像, 记为 $Water(i, j)$ 。为了得到整条河流区域, 必须对河流段进行连接, 对其几何形状进行一定的规整。

本文用形态学的膨胀和腐蚀操作对河流段图像进行处

理。定义 3×3 的模板 $T = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}$, 对河流段二值图先做 n

次膨胀然后做 n 次腐蚀操作。 n 至少为 1, 其上限是河流宽度和桥梁宽度二者的大值。经过多次实验, 在 5m 左右的光学卫星遥感图像中对于大型桥梁 $n=10$ 比较合适; 对于中型桥梁 $n=6$ 或 5 效果比较好。经过 n 次膨胀后河流段之间已经连接, 接着做 n 次腐蚀操作恢复原河流的宽度。得到完整的河流二值图像, 记为 $Rriver(i, j)$ 。至此我们得到水体图像 $Water(i, j)$ 和河流的完整图像 $Rriver(i, j)$ 。

4 桥梁的识别

4.1 河流中线提取

接下来进行桥梁的检测。处理时不采取对整幅图像扫描检测的方法, 而是沿河流中线对图像进行检测, 这样可以加快检测的效率, 并提高检测率。因而首先必须提取河流的中线, 本文采用形态学的细化来提取河流中线即骨架线, 具体算法见文献[9]。

4.2 桥梁的检测

在桥梁检测之前, 先提取河流 $Rriver(i, j)$ 和水体 $Water(i, j)$ 的边缘轮廓。边缘轮廓提取的方法如下: 定义一个 3×3 的模板(图 1), P_1 是当前像素。经过前面处理后所得图为二值图, 假设河流区域像素值为 1, 非河流区域值为 0, 计算当前像素周围 8 个像素值之和, 如果和为 8, 即 $\sum_{i=2}^9 P_i = 8$, 说明相邻 8 个点都处于目标区域之内, 不对当前像素处理; 同理如果和为 0, 则处于非河流区域, 也不对当前像素作处理; 如果和既不为 8 也不为 0, 则说明模板处于边界区域, 记录当前点坐标作为边缘。

P_2	P_3	P_4
P_5	P_1	P_6
P_7	P_8	P_9

图 1 二值图边缘轮廓提取模板

Fig.1 Template for outline extraction in binary image

对河流和水体图分别做上述处理后可得到河流的边缘图(记为 $RiverEdge(i, j)$)和水体的边缘图, 由于水体是被桥梁

分割而成的各河流段, 因而桥梁的边缘也可在水体边缘图中得到表现, 在以下检测过程中将主要用到其中的桥梁边缘线, 因此将水体边缘图等同的看作桥梁边缘图记为 $BridgeEdge(i, j)$ 。

不容置疑, 假如河流上存在桥梁, 河流中线和 $BridgeEdge(i, j)$ 之间必定会有交点。这些交点即为河流中线与桥梁边线的交点, 并且这些点亦为桥边缘线的中点。交点求出后, 在正确的情况下这些交点应该是成对出现的。但由于所提取的轮廓在拐角处可能会存在三连点的情况, 因而沿中线进行检测时可能在桥梁的某一边缘处会记录下两个或多个点, 因此需剔除多余点。处理方法是对所求交点进行比较, 若有交点在另一点的 8 邻域范围内, 则只记录其中一个点。

经过冗余点去除后得到的交点满足唯一性, 可以对其进行配对。从记录下来的第一点开始, 相邻的两个交点 $B_1(x_1, y_1)$ 和 $B_2(x_2, y_2)$ 可以确定一座桥梁。则该座桥梁的位置可由以下公式求得:

$$B_c(x, y) = \left(\frac{x_1 + x_2}{2}, \frac{y_1 + y_2}{2} \right) \quad (3)$$

记录的交点个数除 2 即为桥梁的个数。

4.3 桥梁识别

至此我们获取了潜在桥梁的各边缘中点对, 但这些点可能存在虚警, 因此在识别之前需对已有的检测结果进行进一步证实, 以便得到更可靠的结果。文中采用两个准则进行限制。

准则 1 根据其结构知识可知桥梁应该有一对平行边。以所检测出的桥梁边缘中点为起始点, 以河流宽度为限制, 我们可以对桥梁的边缘线进行跟踪, 记录下跟踪点的坐标并对其进行最小二乘拟合, 求得边缘的斜率。因为桥梁有两条边, 故可以获得两个斜率值, 求出对应两边的方位角度并进行比较, 若角度差小于某一阈值则认为其为桥梁, 否则进行剔除。对求出的桥梁边线对的方位角取平均, 即得到桥梁的方位角。

准则 2 由于光学卫星影像为中心投影, 成像接近于正视。在图像上桥梁和河流边线之间的夹角要大于某个阈值。因此可以根据此准则对桥梁的虚目标进一步剔除。

经过实验, 对于准则 1 本文选择阈值 $\theta = 5^\circ$, 对于准则 2 选取阈值为 $\alpha = 30^\circ$ 。对桥梁进行虚警剔除后, 可以计算其它如桥梁宽度、长度等参数。

在计算河流的宽度时, 我们取桥梁边缘中点沿河流上下游各取 2 个像素的位置, 并以这两点连线的垂线方向进行生长, 当与河流边线 $RiverEdge(i, j)$ 相交时, 记录生长的点的个数即得到河流的宽度。

桥梁边线的斜率求得后, 由于桥梁两边线的中点已经求得, 可以构建两平行边线的直线方程, 求两线之间的距离即为桥梁的宽度。

桥梁的长度计算和河流宽度的计算原理一样。以桥梁边线的中点为起始点,按所求得斜率在两个相反的方向上进行增长,当与河流边线产生交点时停止增长,记录下来的像素个数即为桥梁的长度。

在计算时必须注意当为垂线时,斜率为无穷大,此时需要单独处理。

5 实验与验证

根据前面的分析,我们选取 SPOT-5 卫星 5m 分辨率的全色波段图像作为实验数据对本文算法进行验证。图 2,图 3 是所选实验区。实验区中包含了典型的大中型桥梁。大型桥梁约在 15 个像素宽度左右;中型桥梁的宽度约在 3 个像素到 10 个像素之间。

图 2 是运用本算法对中型桥梁的检测和识别。图 2(a)是实验区 1 原图,其中河流区域比较单一。图 2(b)–图 2(d)是桥梁识别的结果。表 1 给出了实验区 1 检测出的桥梁各参数。从结果图和表中可以看出河流上桥梁能比较好的进行识别。桥梁的位置、方位、长度和宽度等参数都能比较正确的获取。图中有一座比较窄的桥梁(桥梁 4),目视解译结果是一座铁路桥,大概 3 到 4 个像素的宽度,运用本文的算法也能够正确的检测出来。图 3 是运用本算法对大型桥梁的检测和识别。图 3(a)是实验区 2 原图,河流中有若干比较大的船只,图 3(b)–图 3(d)是检测结果。表 2 给出了检测结果的各参数。对比原图和结果图可以发现,桥梁 1 的方位有些偏差,究其原因是由于在桥梁附近有一些船只以及露出水面的河滩,在进行水体的粗分割时,带来一些噪声并与河流的边缘相连,在后期处理中没有能够完全清除,进而对桥梁边缘的提取、斜率和长度的求解产生一定的影响,使最终结果的方位有偏差,但其位置信息基本上是正确的。

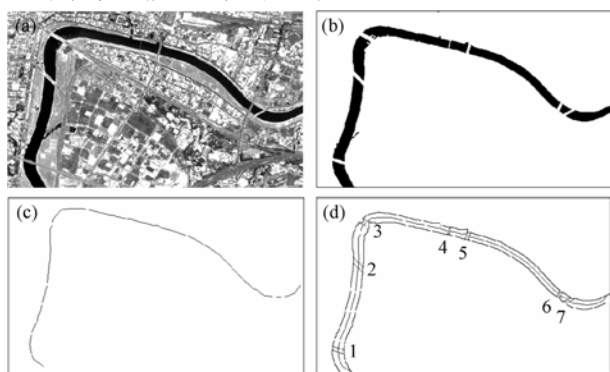


图 2 实验区 1 原图及提取结果

(a) 原图, (b) 经过初步分割和小区域剔除后的水体图结果, (c) 河流中心线, (d) 提取结果(包括河流中心线、河流轮廓线和检测的桥梁边缘线)

Fig.2 Recognition results 1

(a) original image, (b) water areas after segmentation and small regions elimination, (c) river centerline, (d) final result (including river centerline, outline of the river and the edges of the detected bridges.)

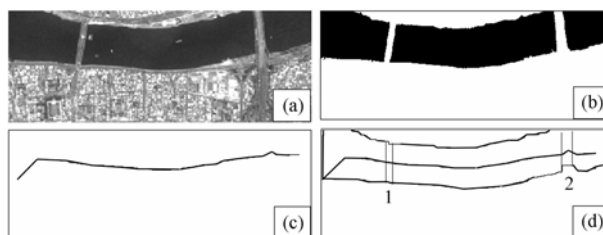


图 3 实验区 2 原图及提取结果

(a) 原图, (b) 经过初步分割和小区域剔除后的水体图结果, (c) 河流中心线, (d) 提取结果(包括河流中心线、河流轮廓线和检测的桥梁边缘线)

Fig.3 Recognition results 2

(a) original image, (b) water areas after segmentation and small regions elimination, (c) river centerline, (d) final result (including river centerline, outline of the river and the edges of the detected bridges.)

表 1 实验区 1 桥梁识别结果参数

Table 1 Parameters of the detected bridges

桥梁序号	桥梁中心位置(像素)	桥梁长度(m)	桥梁宽度(m)	桥梁方位($^{\circ}$) (与正北夹角)
1	(45, 309)	135	35	108.127
2	(86, 137)	115	40	133.755
3	(101, 51)	110	50	116.524
4	(273, 67)	90	15	18.953
5	(312, 76)	90	30	18.621
6	(500, 196)	70	30	30.605
7	(519, 208)	95	30	60.782

表 2 实验区 2 桥梁识别结果参数

Table 2 Parameters of the detected bridges

桥梁序号	桥梁中心位置(像素)	桥梁长度(m)	桥梁宽度(m)	桥梁方位($^{\circ}$) (与正北夹角)
1	(130, 58)	380	60	0.000
2	(447, 42)	345	95	0.000

6 结论及进一步工作

本文提出一套基于知识的光学遥感卫星影像河流上桥梁识别的流程。通过以上的分析,算法流程可总结为图 4。算法针对桥梁在影像中的特点及与河流之间的关系,建立了通常情况下河流上桥梁识别的知识规则,根据知识规则,以河流区作为桥梁识别的范围,沿河流中线进行检测。与其它算法相比本文算法计算效率高、易于实现;利用标记法对初步分割后的结果进行处理可以有效地剔除假目标区;利用形态学的细化算法能够快速提取河流的中心线,有利于桥梁边缘线的提取;将检测的范围限制于河流的中心线附近,有利于检测效率和结果的提高。以 SPOT-5 卫星遥感全色影像为实验数据进行验证,检测率达到 90% 以上,证明了本文算法的有效性。

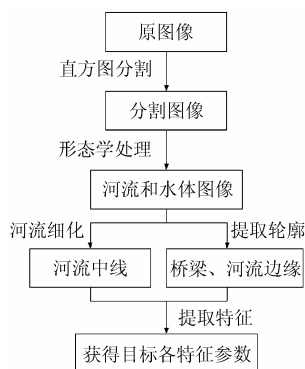


图4 算法流程框图

Fig.4 Diagram showing the bridge recognition algorithm

本文算法沿河流中心线进行检测, 依赖于河流的提取, 在山区反射率较低的地区分割之后图像中会增加更多的假目标区; 另外当河流处于干水季时会对检测结果有影响。解决此问题的办法可以针对一些特殊情况建立更完善的知识, 但是建立这种具有普遍意义、完善的规律是很有难度和复杂的, 需要考虑各种各样的情形。比如对河流的描述, 它有可能是季节性河流, 可能在某一时段存在, 在某一时段不存在; 也有可能其断流没有季节性的规律。另一个解决办法是在检测识别过程中加入如位置等先验信息, 另外还可以利用多波段图像中在不同光谱范围内的信息, 减小目标提取的不确定性。这是以后研究工作关注的方面。

参 考 文 献

[1] 徐胜荣, 徐凡, 叶秀清等. 基于知识的桥梁目标识别方法研究.

模式识别与人工智能, 1992, 5(2): 123 - 128.

- [2] 袁晓辉, 金立左, 李久贤, 夏良正. 基于兴趣区检测与分析的水上桥梁识别. 红外与毫米波学报, 2003, 22(5): 331 - 336.
- [3] Roger Trias-Sanz, Nicolas Loménie. Automatic bridge detection in high-resolution satellite images. In J. L. Crowley et al., editors, Proc. of the 3rd Int. Conf. on Computer Vision Systems (ICVS 03), volume 2626 of Lecture Notes in Computer Science, Graz, Austria, April 2003: 172 - 181.
- [4] 琚春华, 王伟明, 王光明等. 一种桥梁目标识别方法的研究. 计算机工程, 1999, 25(6): 19 - 21.
- [5] 姜骊黎, 史册, 杨海波等. 遥感图像水上桥梁的识别. 模式识别与人工智能, 2000, 13(2): 214 - 217.
- [6] 吴皓, 刘政凯, 张荣. TM 图像中桥梁目标识别方法的研究. 遥感学报, 2003, 7(6): 478 - 484.
- [7] 侯彪, 刘芳, 焦李成. 高分辨率 SAR 图像中桥梁目标的自动分割. 激光与红外, 2004, 34(1): 46 - 49.
- [8] 章毓晋编著. 图象处理和分析. 北京: 清华大学出版社, 1999: 195 - 207.
- [9] 何斌, 马天予, 王运坚等编著. Visual C++ 数字图像处理. 北京: 人民邮电出版社, 2001: 386 - 393.

吴 樊: 男, 1976 年生, 博士生, 研究方向为雷达遥感、图像融合等.

王 超: 男, 1963 年生, 研究员, 博士生导师, 研究领域为微波遥感.

张 红: 女, 1972 年生, 讲师, 研究领域为雷达遥感.

张 波: 男, 1976 年生, 博士生, 研究方向为雷达遥感.

张维胜: 男, 1975 年生, 博士生, 研究方向为雷达遥感.