

基于兴趣区检测与分析的水上桥梁识别*

袁晓辉 金立左 李久贤 夏良正
(东南大学自动控制系, 江苏, 南京, 210096)

摘要 研究自然景物光学图像中大型水上桥梁自动识别的问题, 提出了一种新的基于知识的两阶段目标识别策略. 首先在全视场中检测符合水上桥梁上下文关系的兴趣区; 随后对检出的兴趣区进行图像分割与特征抽取, 基于桥梁的几何特征运用模糊推理识别目标, 并选择中央桥墩或桥身为瞄准点. 对多种场景多种类型的大型水上桥梁光学图像作识别实验, 结果表明此方法有较高的目标识别率与计算实时性.

关键词 图像理解, 自动目标识别, 桥梁识别, 模糊推理.

RECOGNITION OF BRIDGES OVER WATER THROUGH DETECTING AND ANALYZING REGIONS OF INTEREST*

YUAN Xiao-Hui JIN Li-Zuo LI Jiu-Xian XIA Liang-Zheng
(Department of Automatic Control Engineering, Southeast University, Nanjing, Jiangsu 210096, China)

Abstract To recognize large bridges over water under complicated background from optic images of natural scenes, a novel two-step knowledge-based strategy was presented. First, all regions in accord with the contextual description of the scenario about bridges over water, regions of interest, were detected from the field of view. Then, image segmentation and feature extraction were performed over all sub images of the detected regions of interest. Finally, based on the geometric characters of bridges, targets were identified by utilizing fuzzy reasoning approach and either the central pier of the bridge or the middle of the bridge body was selected as aimpoint furthermore. Experiments were conducted over different optic images of different kinds of large bridges over water in natural scenes, and the results demonstrated that the approach brought forth herein performed well in recognition accuracy and computational efficiency.

Key words image understanding, automatic target recognition, bridge recognition, fuzzy reasoning.

引言

自动目标识别(Automatic Target Recognition-ATR)是图像理解的研究领域之一. ATR 系统的任务是: 确定所摄图像中是否存在感兴趣的目標, 并为目标赋予合理解释, 必要时还要指明目标在视场中的位置. 因此, ATR 系统必须满足图像理解的基本要求, 而应用场合的特殊性又使其有别于一般的图像理解系统.

近年来, 有关自然景物图像人工工程目标自动识别的研究引起了 ATR 界的关注^[1-5], 大型水上桥梁的识别是其典型代表, 人工工程目标的识别目前常采用知识驱动型策略, 即在领域知识的指导下直接进行图像分割、特征抽取与匹配识别等处理^[2]. 与数据驱动型策略相比, 算法效率有

所提高, 但依然存在部分算法复杂、实时性差、硬件实现困难等问题.

桥梁光学图像背景复杂, 细节丰富, 若基于领域知识直接对整幅图像进行分割、特征抽取与匹配识别等处理, 算法复杂费时, 硬件实现困难. 为解决算法复杂性与计算实时性之间的矛盾, 本文提出了一种新的基于兴趣区(Regions of Interest-ROI)检测与分析的两阶段目标识别策略算法, 对多种场景多种类型的大型水上桥梁光学图像作识别实验, 结果表明本文方法具有较高的目标识别率与计算实时性.

1 兴趣区的检测

兴趣区的成功提取可以简化特征抽取、目标识别等后续处理, 进而提高 ATR 系统的整体性能. 因

* 国防科技预研基金(批准号 97J1.5.2. JW0601)资助项目
稿件收到日期 2002 - 01 - 03, 修改稿收到日期 2003 - 04 - 21

* The project supported by the Preliminary Research Foundation of National Defence of China(No. 97J1.5.2. JW0601)
Received 2002 - 01 - 03, revised 2003 - 04 - 21

此,对自动目标识别任务而言,兴趣区检测是否有效极为关键.对飞机、坦克、舰船等易于与环境相分离的团块状军事目标,目前已提出许多比较成熟的 ROI 检测算法,但对桥梁、军港、机场跑道等人工工程目标,由于目标周围背景复杂且目标通常又与环境紧密结合、融为一体,所以很难将其从背景中完整地分割出来,迄今还没有一种普遍适用的 ROI 检测算法.为此,本文提出了一种基于场景模型的 ROI 检测算法.

1.1 建立大型水上桥梁的场景模型

对人工工程目标而言,通常存在最佳攻击方向,导弹从这个方向进入命中率最高.军事上具有打击价值的大型桥梁一般都横跨于宽阔水面之上,位于桥梁两边的河岸上通常有建筑物、土丘、树木以及小的水泊等.由于背景物的遮挡,加上导弹的飞行高度较低,当导弹沿桥面方向进入时,能够看到桥面的距离一般较近,能够拍到一定大小桥面图像的距离更近,所以选择由桥面进入为导弹的攻击方向是不适宜的.当导弹顺着河流从桥梁侧面方向进入时,由于桥身离水面有一定高度,中间遮挡少,导弹能够在较远的距离上拍到具有一定大小的桥梁侧面图像,未制导距离大,图像特征丰富,故而选择顺着河流由桥梁侧面进入为导弹的最佳攻击方向.在分析多种典型大型水上桥梁光学图像的基础上,可建立如下场景模型:(1)桥梁的灰度与河流两岸陆地的灰度十分接近;(2)河流面积较大;(3)桥梁横跨在河流之上;(4)桥梁将河流分割成灰度接近的 2 个均质区域.

1.2 桥梁 ROI 检测前的预处理

桥梁光学图像一般都有较大的噪声,其中主要是散粒噪声.散粒噪声相关性弱,容易滤除,滤波方法也比较多,如中值滤波,统计平滑滤波等.本文选用 8 邻域均值滤波.

此外,桥梁光学图像中目标周围背景复杂,目标与背景灰度分布情况多变,桥身还时常会在桥墩或水面上投下阴影,采用直方图阈值分割法等传统算法分割效果较差.由桥梁的场景模型可知,河流通常表现为图像中的大面积均质区域,而在梯度运算下,均质区域对应的梯度幅值较小,所以可采用梯度算子对灰度图像作梯度运算,将梯度幅值小于阈值的像素设定为均质区域,并假设为低置信度河流区域(也可能是陆地、天空等其它均质区域),而将梯度幅值大于阈值的像素假设为非河流区域,由此获得二值图像,本文选用 Robert 算子对均值滤波图像作梯度运算,并取梯度幅值的均值为阈值进行二值化处理.

二值化图像 $b_0(i,j)$ 中一般有许多细小黑团块,对应桥梁图像中较小面积景物的内部区域,运用形态学二值膨胀滤波可滤除这些小面积区域,并能消除区域边界上的较小断裂,改善二值图像质量.但模板过大就会造成邻近区域的粘连,不利于后续处理,经反复实验,本文选用 3×3 十字形模板,对 $b_0(i,j)$ 中的白像素进行二值膨胀滤波,效果较好.

假设经二值膨胀滤波后的二值图像为 $b_1(i,j)$.在 $b_1(i,j)$ 中通常还有一些小面积黑团块,本文采用对 $b_1(i,j)$ 中的像素用基于映射表的快速算法^[5]进行标记,把小于面积阈值的黑团块变为白团块,获得二值图像 $b_2(i,j)$.

1.3 桥梁 ROI 检测

经过上述处理后,桥梁图像中大面积均质区域已被分离出来,它们一般与图像中的水域、天空或陆地等景物对应,将其统一假设为低置信度河流区域,表现为 $b_2(i,j)$ 中的黑团块,而桥梁以及与其相连的陆地等景物则表现为 $b_2(i,j)$ 中的白团块.根据桥梁的场景模型提出下列规则:(1)桥梁在二值图像上表现为相邻黑团块之间的白团块;(2)与桥梁对应的白团块将 2 个互不连通的黑团块分隔开,并且这 2 个黑团块对应着桥梁灰度图像中灰度比较接近的 2 块区域;(3)与桥梁对应的白团块应有一定大小,即白团块的面积应大于面积阈值,在垂直方向上连通的白像素的个数不能过多,应小于长度阈值.

根据上述规则,沿垂直方向对 $b_2(i,j)$ 中的白像素进行扫描,删除连通的像素数超过 40 的像素列、上下相邻黑团块的灰度均值差大于 35 的像素列以及只与一个黑团块相邻的像素列,得到白团块片段.对白团块片段采用基于映射表的快速算法进行标记,删除面积小于 200 的白团块片段.经过上述基于上下文关系规则的白团块片段检测后,得到可能与桥梁相对应的白团块片段.在 $b_2(i,j)$ 中搜索它的左右上下边界 (x_l, x_r, y_t, y_b) ,并估算其中心位置 (x_c, y_c) ,其中 $x_c = \frac{1}{2}(x_l + x_r)$, $y_c = \frac{1}{2}(y_t + y_b)$.随后在 $b_2(i,j)$ 中以 (x_c, y_c) 为中心开一个 151×51 的窗口,得到二值子图像 $sb^*(i,j)$.计算其黑像素的个数,若个数小于 $sb^*(i,j)$ 总面积的 25% 则视为无效,否则选为桥梁 ROI,并在原始图像的相应位置分离出与 $sb^*(i,j)$ 同样大小的 ROI 子图像 $sf_0(i,j)$.

2 兴趣区的分析

ROI 检测对桥梁的分析是很粗糙的,检出的

ROI 置信度相对较低,必须利用桥梁的结构特征对 ROI 子图像作进一步分析,验证其是否确实含有与桥梁的结构模型相匹配的目标.若有这样的目标存在,还需运用有关桥墩的结构特征选择瞄准点.对桥梁的识别是根据它的结构模型进行的,分析对象是 ROI 子图像 $sf_0(i,j)$. 根据桥梁的结构模型,依次对 $sf_0(i,j)$ 进行图像分割、特征抽取与匹配识别等处理,完成自动识别.

2.1 建立大型水上桥梁的结构模型

军事上具有打击价值的桥梁通常横跨在宽阔水面上且有多个桥墩.大跨度桥梁的桥墩个数较少,一般在桥身上方可能有拉索.导弹顺着河流从桥梁侧面进入时具有较高的命中率,故而要从这个方向上建立桥梁的结构模型:(1)桥身是由 2 根近似平行的直线段包围的较长的条状物;(2)桥墩是桥身下方多个具有一定大小的突起物.

2.2 ROI 子图像分割

桥梁光学图像的对比度一般较低,而且还含有噪声,必须对其作预处理,改善图像的质量后再作分析,目前对 ROI 子图像主要进行对比度增强与低通滤波 2 种处理:(1)对比度增强采用较为简单的线性拉伸算法,将 $sf_0(i,j)$ 的灰度范围线性变换到 $[0, 255]$,获得灰度子图像 $sf_1(i,j)$,可显著提高 ROI 子图像的对比度;(2)桥梁光学图像中的噪声主要是相关性较弱的散粒噪声,经对比度增强后, $sf_0(i,j)$ 中的噪声也得到了增强.采用 8 邻域均值滤波器对灰度子图像 $sf_1(i,j)$ 作低通滤波,获得灰度子图像 $sf_2(i,j)$,可明显改善 ROI 子图像的质量.

ROI 子图像中目标与背景的灰度分布复杂多变,一般的分割方法难以奏效,本文采用 2 种分割算法同时进行分割:一是采用小波边缘检测算法^[5]检测 $sf_2(i,j)$ 的边缘,获得边缘子图像 $se_0(i,j)$;二是根据水体的灰度分布范围运用直方图峰值聚类算法^[6]同时选 2 个阈值对 $sf_2(i,j)$ 进行二值化,获得二值子图像 $sb_0(i,j)$.

对 ROI 子图像的二值化过程就是将水域从 $sf_2(i,j)$ 中分离出来的过程.在检测 ROI 的同时已获得与其对应的二值子图像 $sb^*(i,j)$,其中含有 2 块与水域对应的大面积黑团块.由 $sf_2(i,j)$ 可以估算出与黑团块对应的 2 个区域的各自的灰度均值,实际上就是相应的低置信度水域的平均灰度.根据这两块水域的平均灰度构造一个灰度分布区间,将灰度处于这个区间的像素划分为水域,而将灰度处于这个区间外的像素划分为非水域.水域灰度分布区间的

左右边界是采用直方图峰值聚类算法确定的.

直方图峰值聚类算法是一种根据约定规则对直方图作峰谷标记的算法:首先构造 $sf_2(i,j)$ 的灰度直方图,并用高斯滤波器作平滑;随后对平滑后的直方图按照下列规则对各灰度 k 做标记 $m_k, k=0,1,\dots, 255, h_k$ 为灰度 k 出现的次数:

$$m_k = \begin{cases} +1 & \text{if } (h_{k-1} > h_{k+1}) \wedge (h_{k-1} \geq h_k) \\ -1 & \text{if } (h_{k+1} > h_{k-1}) \wedge (h_{k+1} \geq h_k) \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (1)$$

$$m_k = m_{k-1} \quad \text{if } h_{k-1} = h_{k+1}. \quad (2)$$

对 m_k 根据下列规则标记直方图的峰和谷:(1)若 $m_{k-1} = -1$ 并且在 $k-1$ 之后 $+1$ 出现在之前,则 k 处为一个峰;(2)若 $m_{k-1} = +1$ 并且在 $k-1$ 之后 -1 出现在 $+1$ 之前,则 k 处为一个谷.在对灰度直方图作峰谷标记后,可以搜索到一个包含上述 2 个水域平均灰度由直方图的 2 个谷所构成的最小灰度区间 $[t_1, t_2]$,根据 $[t_1, t_2]$ 对 $sf_2(i,j)$ 进行二值化,二值化过程可表示为:

$$sb_0(i,j) = \begin{cases} 0 & sf_2(i,j) \in [t_1, t_2] \\ 255 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (3)$$

事实上,当人观察一个物体时,一般在注意物体本身的细节时对物体周围背景的细节并不感兴趣,这就是人眼的“注视”机制.在分析 ROI 子图像时,关心的也只是其中的白团块,所以仍需对 ROI 子图像的分割结果作一次修正,只有在二值子图 $sb^*(i,j)$ 中为白像素时在边缘子图像 $se_0(i,j)$ 和二值子图像 $sb_0(i,j)$ 的相应位置上才能出现白像素,删除不符合规则的白像素,得到修正后的边缘子图像 $se_1(i,j)$ 和二值子图像 $sb_1(i,j)$.

2.3 目标特征抽取

由桥梁的结构模型可知,桥梁的主体是桥身,而桥身的边界则主要表现为图像中的一对近似平行线.因此,要识别桥梁,首先就要抽取 ROI 子图像中的近似平行线.目前已提出很多直线抽取算法,这些算法有些由于计算复杂性太高而不宜采用,有些则由于检测效果不佳而不能使用,为此,本文提出了一种基于 Hough 变换的直线模糊检测技术.它先用预定的模糊隶属函数对 Hough 变换后的截距频数分布作平滑后再抽取直线,采用这种算法抽取桥身外缘线,实验表明即使在桥身分割有断裂或被遮挡时也能取得很好的检测结果.

2.3.1 桥身方向分析

检测 ROI 的同时已得到该 ROI 内可能与目标

相对应的白团块片段,对二值子图像 $sb^*(i,j)$ 中的白团块片段沿垂直方向扫描得到连通的像素列在图像中的起始位置与长度,统计该长度的像素列出现的次数,获得列长频数分布 l_k . 在 l_k 上搜索与最高频数值对应的列长 k_{max} ,记录列长处于 $[k_{max} - 5, k_{max} + 5]$ 内的所有像素列的起始位置,用一元线性回归法估计由这些点所拟合的直线的斜率 k_b 作为桥身方向. 设列长处于 $[k_{max} - 5, k_{max} + 5]$ 内的所有像素列的起始位置为 $(x_i, y_i), i = 1, 2, \dots, n$, 由一元线性回归法可得

$$k_b = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}, \tag{4}$$

其中 $\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i, \bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i$.

2.3.2 提取桥身外缘线

根据桥身方向 k_b 用基于 Hough 变换的直线模糊检测技术分别提取边缘子图像 $se_1(i,j)$ 与二值子图像 $sb_1(i,j)$ 中沿该方向的直线. 由于桥身在成像过程中可能会发生畸变(如弯曲),在桥身下方会有桥墩或阴影,桥身上方也可能有其它遮挡物(如拉索、加固梁等),再加上图像分割时造成的断裂,所以不可能检测出严格的直线,故引入如下的模糊隶属函数 $\mu_k(x)$ 为:

$$\mu_k(x) = \begin{cases} \frac{|x - k|}{5}, & |x - k| \leq 5 \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \tag{5}$$

式(5)定义的隶属函数 $\mu_k(x)$ 是一个以 k 为对称中心的三角形函数,用于对经 Hough 变换得到的截距频数分布进行平滑,平滑程度与 $\mu_k(x)$ 的窗宽有关. 窗宽过大时截距频数分布会过于平滑,窗宽过小时会平滑不足,这都得不到好的检测效果. 本文经反复实验发现,窗宽取 11 比较合适.

沿水平方向对边缘子图像 $se_1(i,j)$ 在从中心往左右各 1/4 宽度的范围内,对各像素 (i,j) 作 Hough 变换,计算截距 $b_{ij} = k_b \times i - j$,其中 k_b 是由式(4)估算的桥身方向,对 b_{ij} 取整后得 b ,估算相应 b 出现的频数构造截距频数分布 $h_0(b)$,再用隶属函数 $\mu_b(x)$ 作平滑,得平滑频数分布 $h_1(b)$,将其中频数值超过 1/3 宽度的截距记录下来,构造桥身外缘线表 T_0 .

沿水平方向对二值子图像 $sb_1(i,j)$ 在从中心往左右各 1/4 宽度的范围内,对其中的白像素沿垂直方向扫描,记录连通的白像素列的起始位置与长度,并统计某种长度的连通列出现的频数 k ,构造列长频数分布 l_k ,分别输出频数超过 1/3 宽度列的起始位置与终止位置,生成上边缘图与下边缘图. 分别对上边缘图与下边缘图作 Hough 变换,直线模糊检测求得平滑频数分布,再采用直方图峰值聚类算法分析峰和谷,分别将上边缘图与下边缘图的平滑频数分布的峰当中频数值超过 1/30 宽度的峰所对应的截距记录下来,生成上外缘线表 T_1 和下外缘线表 T_2 .

2.4 基于模糊推理的桥身识别

经过对目标的特征抽取,已经获得桥身外缘线表 T_0 以及上外缘线表 T_1 和下外缘线表 T_2 . 桥身存在的条件是:当在桥身外缘线表中的某位置有桥身外缘线的话,在上外缘线表或下外缘线表的对应位置也应存在外缘线. 根据上述条件,建立识别桥身的规则如下:(1)如果在桥身外缘线表中某位置上有外缘线且在上外缘线表的对应位置上也有外缘线,那么在这个位置上有一条上外缘线;(2)如果在桥身外缘线表中某位置上有外缘线且在下外缘线表的对应位置上也有外缘线,那么在这个位置上有一条下外缘线;(3)如果上外缘线在下外缘线之上并且其间没有其它的上外缘线或下外缘线,那么这对上下外缘线构成了桥身外缘线.

根据上述规则分析抽取的外缘线,不仅可以确

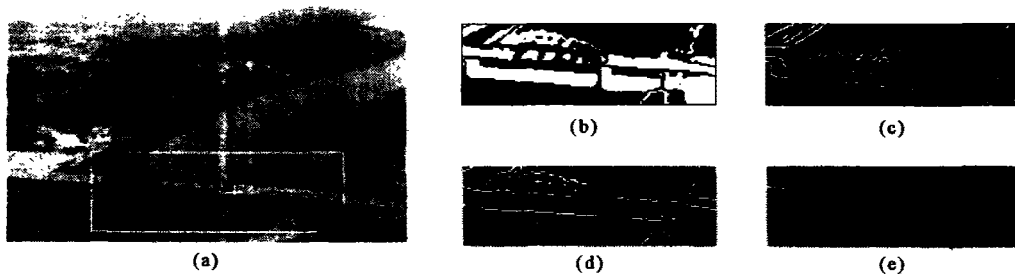


图1 拱桥灰度图像 I (大小为 238 × 163) 的识别实验结果
Fig.1 Recognition case of the gray level image of an arch bridge I (Size is 238 × 168)

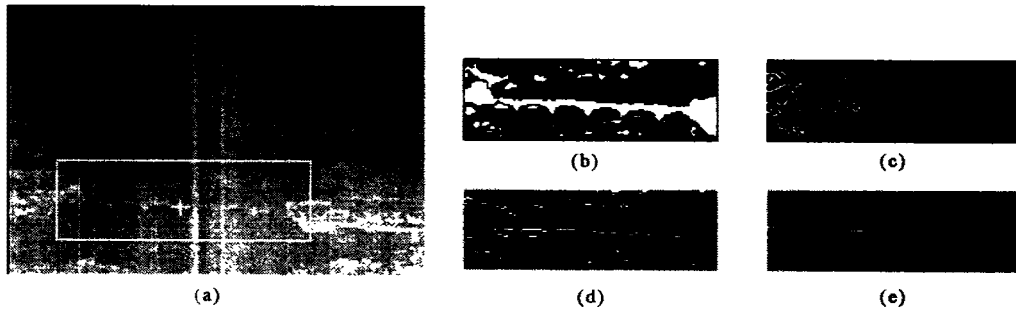


图2 拱桥灰度图像 II (大小为 247×168) 的识别实验结果
 Fig.2 Recognition case of the graylevel image of an arch bridge II (size is 247×168)

定是否有桥身外缘线存在,而且还可以确定是上外缘线还是下外缘线,将最上面的一对上外缘线与下外缘线推理为桥身外缘线.桥身存在的另一个条件是桥梁横跨于水域之上,故仍需对 $sb_1(i,j)$ 中紧邻桥身上外缘线上方的白团块片断进行扫描,观察连通的像素列的列数,若列数小于子图像宽度的 $3/4$,则判为桥身.

2.5 基于模糊投影的桥墩检测

确定桥身上、下外缘线的位置后,对二值子图像 $sb_1(i,j)$ 沿垂直方向扫描白团块,检测在上外缘线下方且距离下外缘线不超过 5 个像素的连通的像素列,记录列的长度,构造桥身下外缘细节投影分布.对桥身下外缘细节投影分布用所定义的隶属函数 $\mu_k(x)$ 作平滑,随后对平滑细节投影分布用直方图峰值聚类算法分析峰和谷,分析平滑细节投影分布在峰附近左右各 5 个像素的范围内越过下外缘线的投影像素数是否少于 5 个,若是则判为桥墩并记录列坐标.从 $sb_1(i,j)$ 的中心位置向左右寻找最近的桥墩作为瞄准点,若桥墩位置距离 $sb_1(i,j)$ 中心位置超过子图像宽度的 $3/8$,则认为桥墩无效,此时选择桥身中央位置为瞄准点.

3 实验结果

取 5 种典型大型水上桥梁光学图像的作识别实验,结果如图 1~5 所示.图 1~5 中的(a)是桥梁灰度图像,256 级灰度,图中白线框内为 ROI 子图像,十字丝为瞄准点;(b)是用直方图峰值聚类算法对 ROI 子图像作分割后的二值子图像;(c)是用小波边缘检测算法对 ROI 子图像作检测后的边缘子图像;(d)是对二值子图像作边缘检测后的外缘线子图像,白线是上外缘线,灰线是下外缘线;(e)是最终检测出的桥身外缘线子图像,白线是上外缘线,灰线是下外缘线.

图 1 是拱桥图像的识别结果,图中桥身上方细节丰富,加固梁在桥身上有投影,桥身在桥墩与水面上有投影,导致桥身分割有断裂;图 2 是拱桥图像的识别结果,图像对比度差,桥身成像光照不均匀;图 3 是拱桥图像的识别结果,图像对比度差,桥身桥墩成像灰度差异大,桥身在水面上的投影与桥墩灰度接近,桥身成像弯曲,桥墩检测困难,背景细节丰富,图像分割困难;图 4 是索桥图像的识别结果,图中背景细节丰富,桥

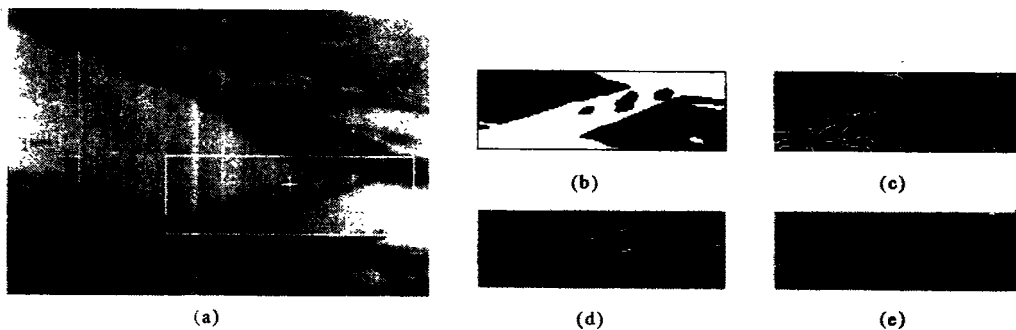


图3 拱桥灰度图像 III (大小为 256×184) 的识实验结果
 Fig.3 Recognition case of the gray level image of an arch bridge III (size is 256×184)

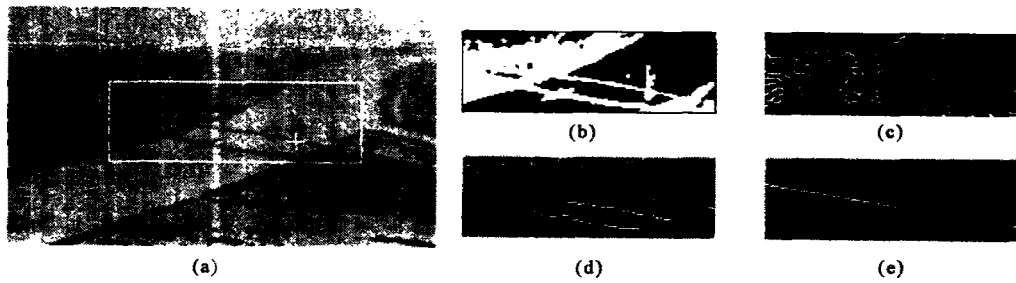


图4 索桥灰度图像 I (大小为 255×149)

Fig. 4 Recognition case of the gray level image of an rope bridge I (size is 255×149)

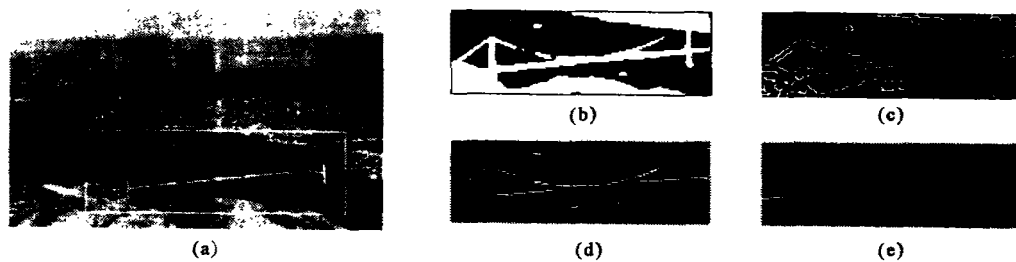


图5 索桥灰度图像 II (大小为 216×134) 的识别实验结果

Fig. 5 Recognition case of the gray level image of an rope bridge II (size is 216×134)

身在水面上有投影,且有船只干扰,桥身成像弯曲;图5是索桥图像的识别结果,图中桥身上方有拉索,水域灰度比桥身暗,而前4例图像中水域灰度比桥身亮,这就要求分割算法具有场景适应能力.由图1~5可见,目标识别与定位准确,已检测出桥墩并取其为瞄准点.识别桥梁采用模糊推理算法,具有鲁棒性,在桥身被遮挡或图像分割有断裂的情况下,仍然取得了较好的识别结果.算法简单快速,在PⅢ 450MHz微机上做识别实验,完成目标识别和瞄准点选择仅耗时1~2s,若用DSP硬件实现,可望进一步减少运算时间,以构造实用ATR系统.

4 结论

本文研究自然景物光学图像中大型水上桥梁的自动识别问题,提出了一种新的基于兴趣区检测与分析的两阶段目标识别策略,这种方法与计算机视觉研究近年提出的“预注意—注意”视觉机制本质上是一致的.采用本文方法识别目标,避免了直接对整幅图像施行复杂费时的图像分析算法,代之采用简单有效的算法先行检测可能存在目标的区域,而后仅对较小的区域子图像进行精确分析,既获得了较高的识别率,又保证了计算的实时性,对设计实用的ATR系统有现实的指导意义,文中提出的部分算

法亦可推广用于其他传感器图像(如红外图像)中其他人工工程目标(如军港、电厂、机场跑道等)的自动识别.

REFERENCES

- [1] Baker D C, Hwang S S, Aggarwal J K. Detection and segmentation of man-made objects in outdoor scenes: concrete bridges. *J. Optical Society of America A*, 1989, 6(6): 938—950
- [2] XU Sheng-Rong, LI Zhong-Xing. Research on knowledge-based bridge recognition method. *PR&AI*(徐胜荣,李忠兴.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
- [3] YUAN Zai-Hua, YANG Shu-Qian. Automatic recognition and tracking techniques for infrared bridge image. *Infrared and Laser Engineering*(袁再华,杨树谦.桥梁红外图像的自动识别跟踪方法探讨.红外与激光工程), 1998, 27(1): 4—8
- [4] Chen H, Shen Z K, Shen J J. Method for searching bridge in IR images. *IEEE AES System Magazine*, 1998, 7: 21—24
- [5] ZUO Zhen, ZHANG Tian-Xu, WANG Guo-You. Research on bridge recognition in long-range infrared images. *Acta Electronica Sinica*(左震,张天序,汪国有.远距红外图像中桥梁目标识别研究.电子学报), 1998, 26(11): 6—9
- [6] JIN Li-Zuo. Research on knowledge-based techniques for ground-base target automatic recognition. Doctoral dissertation, Nanjing: Southeast University(金立左.知识基地面目标自动识别技术研究.博士学位论文,南京:东南大学), 2000
- [7] Tsai D M, Chen Y H. A fast histogram clustering approach for multi-level thresholding. *Pattern Recognition Letter*, 1992, 13: 245—252