

# 基于改进主动轮廓模型的全景海天线检测

苏 丽 吴俊杰 庞 迪

哈尔滨工程大学自动化学院, 黑龙江 哈尔滨 150001

**摘要** 提出了一种基于改进主动轮廓模型的海天线检测算法,检测全景海域图像中的椭圆海天线。通过全分辨率算法获取图像的视觉显著图,提取全景设备区在全景图像中的位置,以消除全景设备区干扰对海天线检测的不良影响。根据全景海天线为椭圆形这一特征,将构造的形状能量约束项加入主动轮廓模型中作为新的能量函数,使活动轮廓线的形状在收敛过程中受到限制,从而成功收敛到全景海天线上。实验结果表明,该算法对不同拍摄条件下的全景图像均适用,检测准确率达到96%,普适性和稳健性良好。

**关键词** 机器视觉; 海天线检测; 主动轮廓模型; 全景图像; 视觉显著图

**中图分类号** TP391.4 **文献标识码** A

**doi:** 10.3788/AOS201636.1115003

## Panoramic Sea-Sky-Line Detection Based on Improved Active Contour Model

Su Li Wu Junjie Pang Di

College of Automation, Harbin Engineering University, Harbin, Heilongjiang 150001, China

**Abstract** A sea-sky-line detection algorithm based on the improved active contour model is proposed to detect the elliptical sea-sky-line of the panoramic sea image. The visual saliency map of the image is obtained by the full resolution algorithm, and then the position of the panoramic device area in the panoramic image is extracted to eliminate its adverse effect of device area interference on the sea-sky-line detection. According to the characteristic that the panoramic sea-sky-line is elliptical, a shape energy constraint function is constructed and added to the active contour model, so a new energy function is formed. The new energy function limits the shape of the active contour in the convergence process, and the contour shape is converged to the panoramic sea-sky-line successfully. Experimental results show that this algorithm is applicable for panoramic images under different shooting conditions and its detection accuracy reaches 96%. The universality and robustness of the proposed algorithm are excellent.

**Key words** machine vision; sea-sky-line detection; active contour model; panoramic image; visual saliency map

**OCIS codes** 150.1135; 110.2970; 330.1880

## 1 引 言

随着国民经济的快速发展,海域船舶数量急剧增加,船舶交通流量随之增大,面对日益增加的海面船舶交通安全维护和海上搜寻救助工作的需求,需要开发先进的海洋监控设备。常规视觉系统的视场角有限,采集装置或被观测物体的突然移动可能使目标移出采集系统的视觉范围,不适于广域大视场监控。近年来兴起的全景视觉系统采用折反射逆投影光学原理成像<sup>[1]</sup>,具有成像一体化、360°大视场、旋转不变性等优点,逐渐在海洋监控领域展露头角。

在海洋监控领域,为了尽早发现目标、为拍摄取证以及救援工作提供更多的准备时间,一般要求在尽可能远的距离检测目标。通常先检测海天线,然后在海天线附近搜寻目标,因此海天线检测成为海上远景目标检测的关键环节。相比于常规海域图像中的直线海天线,折反射全景视觉系统特殊的成像原理导致全景图像中的海天线呈椭圆形(理想情况下呈圆形)<sup>[2]</sup>,称为全景海天线。关于海天线检测算法的研究多数针对红

**收稿日期:** 2016-06-24; **收到修改稿日期:** 2016-07-07

**基金项目:** 国家自然科学基金(51409053)、黑龙江省自然科学基金(E201414, F201414)

**作者简介:** 苏 丽(1976—),女,博士,副教授,主要从事机器视觉检测技术、数字图像处理等方面的研究。

E-mail: suli406@hrbeu.edu.cn

外图像中的直线海天线,均无法直接应用于全景可见光图像中的椭圆海天线检测<sup>[3-6]</sup>。2013年,苏丽等<sup>[7]</sup>提出了基于椭圆拟合的海天线检测方法,该方法先通过最外边缘搜索确定海天线上的离散点,再利用椭圆拟合检测全景海天线,但该方法无法在高海况下检测海天线;2014年,该课题组假设全景海天线为圆形,将圆形上点的梯度方向都指向圆心这一特性作为检测条件检测海天线;但全景海天线实际上呈椭圆形,当椭圆度较大时该算法失效<sup>[8]</sup>。

海天线是海面和天空的交界线,具有典型的边缘轮廓特征。本文提出了一种新的全景海天线检测算法,该算法利用视觉显著图去除对海天线检测具有不良影响的全景设备区干扰;设计了一种改进的主动轮廓模型,精确检测全景图像中的椭圆海天线。

## 2 利用视觉显著图提取全景设备区

由于全景视觉传感器基于折反射逆投影光学原理成像,全景海域图像中不仅包括环境场景信息(如海面和天空),还包括全景采集装置以及搭载全景采集装置的船体的成像(简称全景设备区干扰),干扰区域如图1中矩形方框所示。该干扰区域增加了全景图像背景的复杂度且造成海天线断裂,进行海天线检测之前,有必要对该区域进行提取和分割,以消除该区域对海天线检测的影响。

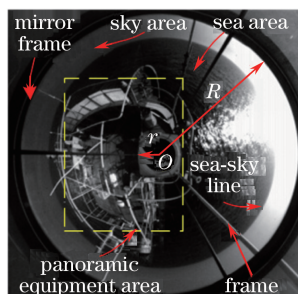


图1 全景海域图像

Fig. 1 Panoramic sea image

全景图像中的全景设备区比较明显,易引起视觉注意。视觉显著图反映了人类的视觉注意机制<sup>[9]</sup>。因此,可以利用视觉显著图得到全景设备区在图像中的位置,以消除该区域对海天线检测的影响。利用Achanta等<sup>[10]</sup>提出的全分辨率算法(AC法)计算全景海域图像的视觉显著图。AC法的基本原理:图像的显著值为输入图像的局部区域 $R_1$ 与周围区域 $R_2$ 的对比度,通过计算感知单元在不同邻域的局部对比度,实现多尺度显著性计算<sup>[11]</sup>。

设像素 $p$ 为区域 $R_1$ 和 $R_2$ 的中心,感知单元 $p$ 所在位置的局部对比度 $S(p)$ 可表示为

$$S(p) = \left\| \frac{1}{N_1} \sum_{k \in R_1} \mu_k, \frac{1}{N_2} \sum_{k \in R_2} \mu_k \right\|, \quad (1)$$

式中 $N_1$ 和 $N_2$ 为区域 $R_1$ 和 $R_2$ 的像素个数, $\mu_k$ 为位置 $k$ 处的特征值。这里 $R_1$ 为一个像素, $R_2$ 为边长范围为 $[L/8, L/2]$ 的正方形区域( $L$ 为图像的长或宽)。不断改变中心像素点 $p$ 的位置,得到整幅图像的显著值;对像素点的显著值进行归一化处理,即可得到图像的显著图。

全景海域图像如图2(a)所示,利用AC法得到的全景图像的显著图如图2(b)所示,图2(b)的视觉显著

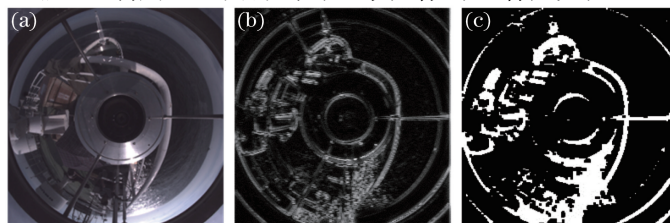


图2 (a)全景海域图像;(b)视觉显著图;(c)视觉显著分割图

Fig. 2 (a) Panoramic sea image; (b) visual saliency map; (c) segmentation image of visual saliency map

分割图如图 2(c)所示。由图 2(b)可知,全景设备区的显著性明显高于海面和天空区域。接着确定全景设备区的位置,利用最大类方差法获取动态阈值,分割视觉显著图;由图 2(c)可知,大部分的全景设备区已被提取出来,从而消除了全景设备区对海天天线检测的影响。

### 3 基于改进主动轮廓模型的全景海天天线检测算法

主动轮廓模型(Snake 模型)的基本思想:定义一条连续的参数曲线,利用能量最小化原理,通过迭代算法使定义的参数曲线的能量达到最小值,设定此时的曲线为所期望的目标轮廓线<sup>[12-13]</sup>。利用 AC 法消除全景设备区干扰后,改进主动轮廓模型,在能量函数中加入形状能量约束项,从而实现对全景海天天线的精确检测。

#### 3.1 主动轮廓模型

主动轮廓可移动的变形曲线  $\nu(s)$  可表示为

$$\nu(s) = [x(s), y(s)], \quad (2)$$

式中  $x(s)$  和  $y(s)$  分别为变形曲线的横坐标和纵坐标,  $\nu(s)$  为单位参量域 ( $s \in [0, 1]$ ) 到图像表面的映射。轮廓曲线的能量泛函  $E_{\text{snake}}$  可表示为

$$E_{\text{snake}} = \int_0^1 \{E_{\text{int}}[\nu(s)] + E_{\text{ima}}[\nu(s)] + E_{\text{cons}}[\nu(s)]\} ds, \quad (3)$$

式中  $E_{\text{int}}$  为依赖于轮廓形状的内部能量函数,体现了轮廓曲线的连续性和平滑性约束;  $E_{\text{ima}}$  为由图像力产生的图像能,与图像梯度或其他特征有关;  $E_{\text{cons}}$  为外部约束力能量,它是根据目标轮廓线存在的区域、特征对变形曲线加以控制和约束的能量项。

一般情况下,  $E_{\text{cons}}$  没有统一的形式,通常不予考虑。内部能量  $E_{\text{int}}[\nu(s)]$  可由弹性能量  $E_{\text{cont}}[\nu(s)]$  和刚性能量  $E_{\text{curv}}[\nu(s)]$  组成,  $E_{\text{int}}[\nu(s)]$  可表示为

$$E_{\text{int}}[\nu(s)] = E_{\text{cont}}[\nu(s)] + E_{\text{curv}}[\nu(s)] = [\alpha(s) |\nu'(s)|^2 + \beta(s) |\nu''(s)|^2] / 2, \quad (4)$$

式中  $\nu'(s)$  为曲线的弹性能量,控制曲线的长度和连续性;  $\nu''(s)$  为曲线的刚性能量,控制活动轮廓线曲率的变化;  $\alpha(s)$ 、 $\beta(s)$  为控制活动轮廓曲线弹性和刚性的权重系数,操纵着模型的物理行为和局部连续性。图像  $I(x, y)$  的图像能  $E_{\text{ima}}$  可定义为

$$E_{\text{ima}} = -|\nabla I(x, y)|^2, \quad (5)$$

式中  $\nabla$  为梯度算子。

图像中曲线  $\nu(s)$  由若干控制点构成,因此可将上述问题离散化。设  $\nu_1, \nu_2, \dots, \nu_n$  为主动轮廓线上的  $n$  个控制点,离散化的主动轮廓模型可表示为

$$E_{\text{snake}} = \sum_{i=1}^n [E_{\text{cont}}(\nu_i) + E_{\text{curv}}(\nu_i) + E_{\text{ima}}(\nu_i)], \quad (6)$$

$$E_{\text{cont}}(\nu_i) = \alpha_i |\bar{d} - \|\nu_i - \nu_{i-1}\||^2, \quad (7)$$

$$E_{\text{curv}}(\nu_i) = \beta_i \|\nu_{i-1} - 2\nu_i + \nu_{i+1}\|^2, \quad (8)$$

式中  $E_{\text{cont}}(\nu_i)$ 、 $E_{\text{curv}}(\nu_i)$ 、 $E_{\text{ima}}(\nu_i)$  分别为离散形式的弹性能量、刚性能量、图像能量,  $\alpha_i$ 、 $\beta_i$  为加权系数,  $\bar{d}$  为控制点的平均距离。控制点的均匀分布可防止控制点集中到活动轮廓线上曲率较大的位置。

#### 3.2 基于改进主动轮廓模型的全景海天天线检测算法

初始轮廓曲线的位置和能量函数的形式是影响主动轮廓模型检测结果的主要因素。从这两方面入手,结合全景海天天线自身的特点,提出一种基于改进主动轮廓模型的全景海天天线检测算法。

##### 3.2.1 初始轮廓曲线的设置

初始轮廓曲线离目标真实边缘较远时易收敛到局部极小值点,无法得到真实轮廓,因此初始轮廓曲线通常设置在图像边缘附近。根据全景海域图像特点(图 1),设置初始轮廓曲线。当全景设备固定后,采集的全景图像中海天线分布在以固定设备中心  $O$  为圆心、 $r$ (相机固定设备的半径)和  $R$ (双曲面反射镜固定装置的半径)为半径的两个圆环之间。全景视觉系统一旦确定,相机固定设备和双曲面反射镜固定装置的位置便已

知并且固定不变,利用该先验知识,并结合真实海天天线为近似圆形的椭圆形这一特点,设定以相机固定设备中心  $O$  为圆心、 $R - \Delta r$  为半径的圆作为初始轮廓线,其中  $\Delta r$  的确定原则为保证初始轮廓曲线的半径  $R - \Delta r$  处于海天天线半径和反射镜固定装置的半径  $R$  之间。图 3(a)中的红色圆形曲线即为设置的初始轮廓曲线。

### 3.2.2 改进能量函数的构造

当图像背景复杂时,尽管初始轮廓线处于目标边缘附近,也存在无法收敛到目标边缘的可能性。这是因为传统的主动轮廓模型在演化过程中仅使用图像的梯度信息,活动轮廓线上的点很容易收敛到邻域的局部极小值点,从而检测到错误的目标轮廓线。为解决这一问题,根据全景海天天线为椭圆形这一先验知识,将构造的形状能量函数加入到主动轮廓模型中作为约束,活动轮廓线形状在收敛的过程中受到限制,更容易收敛到目标轮廓线(即全景海天天线)。

#### 3.2.2.1 构造形状能量项

设  $E_{\text{shape}}[\nu(s)]$  为新增加的形状能量项,该项使主动轮廓线在向目标轮廓线收敛的过程中保持近似椭圆的形状。对主动轮廓线上的控制点先进行最小二乘法拟合得到拟合椭圆方程,该椭圆方程在  $xy$  平面内可用二次多项式表示为

$$ax^2 + bxy + cy^2 + dx + ey + f = 0, \quad (9)$$

$$4ac - b^2 > 0, \quad (10)$$

式中  $a, b, c, d, e, f$  为椭圆方程的参数。主动轮廓线上第  $i$  个控制点  $(x_i, y_i)$  到该拟合椭圆的距离  $D(x_i, y_i)$  可表示为

$$D(x_i, y_i) = ax_i^2 + bx_i y_i + cy_i^2 + dx_i + ey_i + f = d_i. \quad (11)$$

在迭代收敛过程中,主动轮廓线上的控制点应具有向该拟合椭圆曲线靠近的趋势,而且控制点距离该椭圆曲线越近,形状能量越小。形状能量项  $E_{\text{shape}}[\nu(s)]$  的离散化形式  $E_{\text{shape}}(\nu_i)$  可表示为

$$E_{\text{shape}}(\nu_i) = -\lambda_i |(d_i - d_{\max,i}) / d_{\max,i}|, \quad (12)$$

式中  $d_{\max,i}$  为主动轮廓线上第  $i$  个控制点及其 8 邻域内的点到拟合椭圆曲线距离的最大值,  $\lambda_i$  为第  $i$  个控制点的权系数( $\lambda_i > 0$ )。

#### 3.2.2.2 改进的能量函数

在离散主动轮廓模型中加入形状能量函数后,得到离散化的改进主动轮廓模型为

$$E_{\text{snake}}(\nu_i) = \sum_{i=1}^n [E_{\text{cont}}(\nu_i) + E_{\text{curv}}(\nu_i) + E_{\text{ima}}(\nu_i) + E_{\text{shape}}(\nu_i)], \quad (13)$$

式中  $E_{\text{ima}}(\nu_i)$  为图像力产生的能量。图像力反映轮廓点与图像局部特征的吻合情况,与图像梯度或其他特征有关。海天天线为天空区域和海面区域的交界,具有明显的梯度特征,据此设计了基于梯度函数的图像能量。对图像  $I(x, y)$  进行方差为  $\sigma$  的高斯滤波后的图像  $I'(x, y)$  可表示为

$$I'(x, y) = G_{\sigma}(x, y) * I(x, y), \quad (14)$$

式中  $G_{\sigma}(x, y)$  为方差为  $\sigma$  的卷积高斯滤波算子,起加速收敛的作用。

设第  $i$  个控制点  $\nu_i$  的坐标为  $(x_i, y_i)$ ,  $I'(x, y)$  在点  $(x_i, y_i)$  上沿  $x, y$  方向的方向梯度分别为  $\partial I' / \partial x_i$  和  $\partial I' / \partial y_i$ , 图像能量  $E_{\text{ima}}(\nu_i)$  可定义为

$$E_{\text{ima}}(\nu_i) = -\gamma_i (|\partial I' / \partial x_i| + |\partial I' / \partial y_i|), \quad (15)$$

式中  $\gamma_i$  为第  $i$  个控制点的权系数,  $\gamma_i > 0$ 。由(15)式可知,图像边缘部分的梯度最大,能量最小。

上述构造了改进的能量函数并给出了各能量分量的具体形式。分析新纳入能量函数中的形状能量项  $E_{\text{shape}}(\nu_i)$  所起的作用。从(12)式可以看出,当第  $i$  个控制点距离拟合椭圆曲线为  $d_{\max,i}$  时,  $E_{\text{shape}}(\nu_i) = 0$ ,  $E_{\text{shape}}(\nu_i)$  取得最大值;当第  $i$  个控制点在拟合椭圆曲线上时,  $E_{\text{shape}}(\nu_i) = -\lambda_i$ ,  $E_{\text{shape}}(\nu_i)$  取得最小值。能量函数中增加了(12)式所示形状能量约束后,在进行能量函数最小化的过程中,控制点向距离拟合椭圆曲线更近的点收敛,使得主动轮廓曲线在收敛过程中尽可能地保持椭圆形且更容易越过局部极小值点,从而收敛到目标轮廓线。

### 3.3 基于改进主动轮廓模型的海天线检测算法

采用快速贪婪算法求解改进的主动轮廓模型<sup>[14]</sup>,检测全景图像中的椭圆海天天线,具体步骤如下。



1) 按照 3.2.1 节中所提方法设置初始轮廓线,如图 3(a)所示。

2) 对全景图像  $I(x, y)$  中的每一个像素点,利用 Sobel 算子计算各点在  $x$  和  $y$  方向上的梯度导数  $\partial I/\partial x$  和  $\partial I/\partial y$ ,  $I(x, y)$  在点  $(x, y)$  上的梯度值  $G_{\text{abs}}$  为

$$G_{\text{abs}} = |\partial I/\partial x| + |\partial I/\partial y|。 \quad (16)$$

3) 采用 AC 法提取并分割图 3(a)中的全景设备区,将步骤 2)中相应位置处点的梯度值设置为 0,减小图像的复杂度,消除全景设备区对收敛过程的干扰。

4) 从初始轮廓线上提取  $n$  个初始控制点  $\nu_1, \nu_2, \dots, \nu_n$ 。点的数目由图像的大小决定,这里取控制点数目  $n=400$ 。

5) 从第一个控制点开始,按照(7)、(8)、(12)、(15)式分别计算该点及其附近 8 邻域内点的弹性能量、刚性能量、图像能量和形状能量,并对这 4 种能量分别进行归一化处理。弹性能量的归一化处理:

$$E'_{\text{cont}}(\nu_i) = \frac{E_{\text{cont}}(\nu_i) - D_{\text{min}}(i)}{D_{\text{max}}(i) - D_{\text{min}}(i)}, \quad (17)$$

式中  $D_{\text{max}}(i)$  为第  $i$  个控制点及其 8 个邻域内各点的  $E_{\text{cont}}(\nu_i)$  的最大值,  $D_{\text{min}}(i)$  为第  $i$  个控制点及其 8 个邻域内各点的  $E_{\text{cont}}(\nu_i)$  的最小值。同理,刚性能量、图像能量和形状能量的归一化均与上述处理方法类似,将归一化结果分别记作  $E'_{\text{curv}}(\nu_i)$ 、 $E'_{\text{image}}(\nu_i)$ 、 $E'_{\text{shape}}(\nu_i)$ 。

6) 利用(13)式分别计算第  $i$  个控制点及其 8 邻域内点各自的总能量  $E_{\text{snake}}$ 。为处理方便,将所有控制点  $\nu_i (i=1, 2, \dots, n)$  对应的权系数取为常数。经反复实验,取  $\alpha_i = 1.0, \beta_i = 1.0, \gamma_i = 1.2, \lambda_i = 1.5 (i=1, 2, \dots, n)$ 。

7) 比较第  $i$  个控制点及其 8 邻域内点的总能量  $E_{\text{snake}}$ , 选择这 9 个点中总能量最小的点作为新的活动控制点并设置计数器。当新的活动点和原活动点的位置不同时,在该计数器中加 1,然后处理第  $i+1$  点,直到  $n$  个点依次被处理,从而得到新的轮廓线。

8) 当计数器记录的控制点移动的总数小于给定阈值  $T$  或循环次数超过设定值  $M$  时,认为此时的逼近精度满足要求,曲线已经收敛到真实轮廓,退出循环,否则跳转至步骤 5)。取  $T=20, M=200$ 。

按上述步骤,使用改进的主动轮廓模型进行全景海天线检测。图 3(a)中的红色圆形曲线为按照 3.2.1 节的处理方式设置的初始轮廓曲线,图 3(b)为利用 3.1 节中的经典主动轮廓模型检测的全景海天线,图 3(c)为利用 3.2.2.2 节中改进主动轮廓模型检测的全景海天线。由图 3(b)可以看出,将经典的主动轮廓模型应用于全景海天线检测时,活动轮廓线未完全收敛到真实海天线轮廓曲线上,而是形成了一条不规则的曲线,这是由于迭代过程中部分控制点收敛到了局部极小值点。由图 3(c)可以看出,改进的主动轮廓模型有效实现了全景海天线的检测,这是由于在能量函数中加入形状约束项后,主动轮廓线在收敛过程中总是趋近于椭圆曲线轮廓,因此活动轮廓线更容易收敛到全景椭圆海天线上。

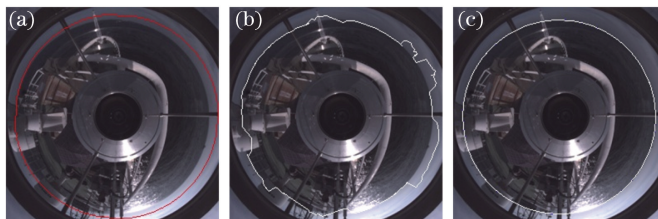


图 3 (a) 初始轮廓线;(b) Snake 模型检测结果;(c) 改进 Snake 模型检测结果

Fig. 3 (a) Initial contour; (b) detection result of Snake model; (c) detection result of improved Snake model

## 4 实验结果与分析

分别在多种情况下进行全景海天线检测实验,并将该实验结果与文献[7-8]中算法的实验结果作对比。实验选取不同的全景视觉系统在不同海域中采集的全景海域图像,如图 4(a)所示。为叙述方便,将选取的全景海域图像从左到右依次记为 figure 1、figure 2、figure 3 和 figure 4,它们的特点为:1) figure 1 中海面区域和天空区域梯度变化明显,大量的全景支架和线缆导致海天线大范围断裂;2) figure 2 中海天线附近的岛屿、岩礁等庞大障碍物对海天线产生严重遮挡,导致海天线大范围断裂;3) figure 3 中船体在高海况下受风

浪影响晃动比较严重,致使部分海天线超出全景采集设备视域范围,造成海天线部分缺失;4) figure 4 中海面区域和天空区域梯度变化明显,但受采集设备安装精度等因素的影响,采集的海天线为长轴和短轴相差相对较大的椭圆形。

由图 4(b)~(d)可知,文献[7]中算法对 figure 1、figure 4 检测成功,对 figure 2、figure 3 检测失败;文献[8]中算法对 figure 1、figure 2、figure 3 检测成功,对 figure 4 检测失败;本文算法对 figure 1、figure 2、figure 3 和 figure 4 的检测均成功。

文献[7]中基于最外边缘搜索的海天线检测算法对 figure 2 检测失败。这是由于 figure 2 中右半边海天线存在大范围山体遮挡,导致海天线大范围断裂;文献[7]在进行最外边缘搜索时,将凸出海天线的山体和天空交界处的边缘点误当作海天线上的点,这些伪边缘点的存在使得拟合出的海天线出现严重偏差,导致检测失败。figure 1 虽然也属于海天线大范围断裂的情况,但基本不存在沿海天线延伸至天空区域的大范围遮挡,而且海面区域和天空区域梯度变化明显,因此文献[7]算法检测成功。本文算法通过改进主动轮廓模型迭代搜索海天线边缘,椭圆形状约束的引入保证了主动轮廓曲线在收敛过程中保持椭圆形,有效克服了山体和天空交界处边缘点带来的不良影响,成功收敛到 figure 2 的全景海天线上。

文献[7]算法对 figure 3 的检测也失败,原因在于文献[7]将理想情况下手动测得的海天线中心和半径作为先验知识,利用该先验知识屏蔽全景设备区干扰信息,以便于后续检测。当真实海天线的中心明显偏离理想情况下的海天线中心时,这种处理方式导致海天线的部分有效边缘点也被屏蔽,从而导致检测失败。本文算法通过 AC 法自动检测并屏蔽全景设备区干扰,有效避免上述问题,成功检测到 figure 3 中的全景海天线。

文献[8]中基于梯度方向的海天线检测算法对 figure 4 的检测失败,原因在于该算法是在假设全景图像为圆形的前提下,利用圆形海天线上点的梯度方向都指向圆心作为检测条件,而 figure 4 中的海天线呈椭圆形,而且是椭圆度相对较大的椭圆形,不具备海天线上点的梯度方向都指向圆心的特征,因此该算法失效。主动轮廓模型理论上可以检测任意形状的目标轮廓线,本文算法基于改进主动轮廓模型成功检测出 figure 4 中的椭圆海天线。

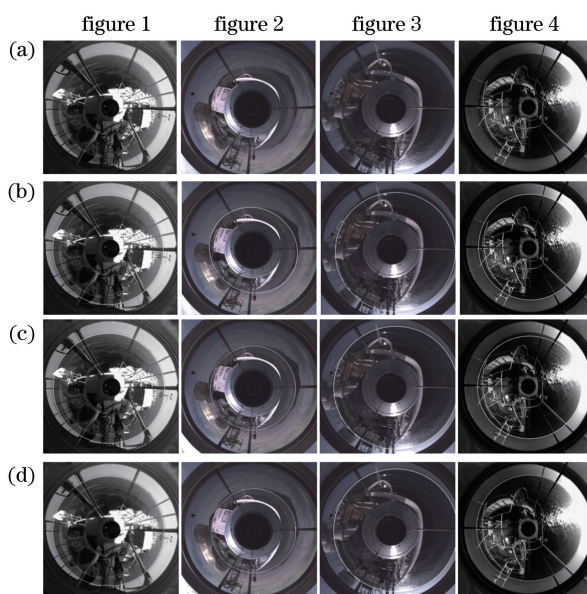


图 4 全景海天线检测结果。(a)全景图像;(b)文献[7]算法结果;(c)文献[8]算法结果;(d)本文算法结果

Fig. 4 Panoramic sea-sky-line detection results. (a) Panoramic images; (b) detection results of the algorithm in reference [7]; (c) detection results of the algorithm in reference [8]; (d) detection results of the proposed method

以上实验对比验证了本文算法的有效性和稳健性。为了进一步验证该算法的优越性和普适性,从全景图像库中随机挑选 200 幅具有以上特点的全景图像进行实验,统计结果如表 1 所示。本文算法的检测准确率达到 96%,高于文献[7-8]中的算法。

表 1 全景海天线检测准确率  
Table 1 Detection accuracy of panoramic sea-sky-line

Algorithm	Number in false detection	Detection accuracy / %
Algorithm in reference [7]	38	81
Algorithm in reference [8]	12	94
Proposed method	8	96

## 5 结 论

考虑到全景图像中的海天线具有明显的边缘轮廓特性,且主动轮廓模型可较好地检测目标轮廓线,提出了一种基于改进主动轮廓模型的全景海天线检测算法。使用 AC 法计算全景图像的视觉显著图,得到图像的视觉显著分割图,从而消除全景设备区干扰对全景海天线检测的影响。利用海天线为椭圆形这一先验知识,构造了改进的能量函数,即在能量函数中加入形状能量约束项,从而使活动轮廓线精确收敛到全景海天线上。大量实验结果表明,本文算法对不同条件下拍摄的全景图像中海天线的检测准确率达到 96%,具有良好的稳健性和普适性。本文算法仍存在有待改进的地方,在下一步工作中,将考虑如何优化迭代过程,以加快收敛速度。

## 参 考 文 献

- Ma Xianglu, Feng Ying, Cao Yu. Concave hyperboloidal catadioptric omnidirectional imaging system[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(8): 2132-2136.  
马相路, 冯莹, 曹毓. 双曲凹面折反射全景成像系统[J]. *红外与激光工程*, 2013, 42(8): 2132-2136.
- Ying Xianghua. A study on omnidirectional camera calibration[D]. Beijing: Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, 2004: 85-92.  
英向华. 全向摄像机标定技术研究[D]. 北京: 中国科学院自动化研究所, 2004: 85-92.
- Hong P, Lei B, Ren T T, *et al.* A fast sea-level line extraction and object detection method for infrared sea image[C]. *SPIE*, 2014, 9300: 930007.
- Dong Y F, Zhang Y F, Zhu C. Extracting sea-sky-line based on improved local complexity[C]. 2010 International Conference on Computer, Mechatronics, Control and Electronic Engineering (CMCE), 2010, 6: 82-85.
- Li Qingzhong, Zang Fengni, Zhang Yang. Ship target detection for moving video maritime surveillance[J]. *Chinese J Lasers*, 2014, 41(8): 0814001.  
李庆忠, 臧风妮, 张洋. 动态视频监控中海上舰船目标检测[J]. *中国激光*, 2014, 41(8): 0814001.
- Lei B, Ren T T, Liu Y B, *et al.* Sea-level line extraction based on piecewise line detection[C]. *SPIE*, 2014, 9301: 93013L.
- Su Li, Zhou Na, Xu Congying, *et al.* On the small ship target detection based on panoramic vision[C]. 32<sup>nd</sup> Chinese Control Conference, 2013: 3575-3579.  
苏丽, 周娜, 徐从营, 等. 基于全景视觉的舰船小目标检测方法研究[C]. 第 32 届中国控制会议, 2013: 3575-3579.
- Su Li, Yin Yisong, Liu Zhilin. Small surface targets detection based on omnidirectional sea-sky-line extraction[C]. 33<sup>rd</sup> Chinese Control Conference, 2014: 4732-4736.  
苏丽, 尹义松, 刘志林. 基于全景海天线提取的海面小目标检测[C]. 第 33 届中国控制会议, 2014: 4732-4736.
- Yang Linna, An Wei, Lin Zaiping, *et al.* Small target detection based on visual saliency improved by spatial distance[J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(7): 0715004.  
杨林娜, 安玮, 林再平, 等. 基于空间距离改进的视觉显著性弱小目标检测[J]. *光学学报*, 2015, 35(7): 0715004.
- Achanta R, Estrada F, Wils P, *et al.* Salient region detection and segmentation[C]. *International Conference on Computer Vision Systems*, 2008, 5008: 66-75.
- Zhao Hongwei, Chen Xiao, Liu Pingping, *et al.* Adaptive segmentation for visual salient object[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2013, 21(2): 531-538.  
赵宏伟, 陈霄, 刘萍萍, 等. 视觉显著目标的自适应分割[J]. *光学精密工程*, 2013, 21(2): 531-538.
- Kass M, Witkin A, Terzopoulos D. Snakes: active contour models[J]. *International Journal of Computer Vision*, 1988, 1(4): 321-331.
- Liu Jianlei, Sui Qingmei, Zhu Wenxing. MR image segmentation based on probability density function and active contour

model[J]. Optics and Precision Engineering, 2014, 22(12): 3435-3443.

刘建磊, 隋青美, 朱文兴. 结合概率密度函数和主动轮廓模型的磁共振图像分割[J]. 光学精密工程, 2014, 22(12): 3435-3443.

- 14 Donna J W, Mubarak S. A fast algorithm for active contours and curvature estimation[J]. CVGIP: Image Understanding, 1992, 55(1): 14-26.