

文章编号 1004-924X(2015)11-3279-10

全景海域图像中的圆形海天线提取

苏 丽*, 庞 迪

(哈尔滨工程大学 自动化学院, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘要:针对全景海域图像背景复杂且海天线呈近似圆形的特点,提出了一种基于分形维数和改进 Hough 圆变换的全景海天线提取算法。该算法首先通过地毯覆盖法计算海域全景图像的分形维数,并据此提取出全景采集装置等设备在全景图像中的成像,消除其对海天线检测的不良影响。针对经典的梯度 Hough 圆变换算法提取全景海天线时无法给出唯一正确解的问题,提出了一种改进的 Hough 圆变换算法来有效提取全景海天线。对 400 幅不同情况下采集的全景海域图像进行了实验。结果表明,提出的算法在理想情况、海天线部分缺失、低对比度和海天线大范围断裂等多种情况下均可以有效提取出全景圆形海天线,检测准确率达 95.75%,适用性和鲁棒性良好。

关键词:全景图像;圆形海天线提取;分形维数;地毯覆盖法;Hough 圆变换

中图分类号:TP391.4 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20152311.3279

Circle sea-sky-line extraction in panoramic images

SU Li*, PANG Di

(College of Automation, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China)

* Corresponding author, E-mail: suli406@hrbeu.edu.cn

Abstract: For a panoramic sea image with complex backgrounds and the sea-sky-line shows as a nearly circle, this paper proposes a panoramic sea-sky-line extraction algorithm based on fractal dimensions and improved Hough circle transform. It firstly calculates the fractal dimensions of the panoramic sea image by blanket-covering method, then extracts the images of panoramic acquisition devices and other equipment to eliminate their adverse effects on sea-sky-line detection based on these fractal dimensions. As the traditional gradient Hough circle transform can not give out a correct solution when it is used to extract the panoramic sea-sky-line, an improved Hough circle transform algorithm is put forward. 400 frame panoramic sea images extracted in different conditions are processed. Experimental results show that this proposed algorithm effectively extracts the circle panoramic sea-sky-lines under conditions of ideal background, lower contrasts images and the sea-sky-line with partial loss or severe breaking and its detection accuracy reaches 95.75%. The applicability and robustness of the proposed algorithm are excellent.

Key words: panoramic image; circle sea-sky-line extraction; fractal dimension; blanket-covering method; Hough circle transform

收稿日期:2015-08-18;修订日期:2015-09-29.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 51409053);黑龙江省自然科学基金资助项目(No. E201414, No. F201414)

1 引言

我国具有绵长的海岸线和广阔海洋领土,海洋维权执法及海上搜救任务繁重,大力开发先进的海域监控设备,研究海上目标检测方法具有重要的意义。目前常规的视觉系统由普通镜头成像,视场角一般为 $40^{\circ} \sim 60^{\circ}$,存在视觉盲区,多组联合使用虽然可以满足全方位监控的要求,但却大大提高了设备成本。近年来发展起来的全景视觉系统能够一次性获取水平方向 360° 、垂直方向大于 180° 范围内场景的图像^[1-2],且无需配备随动系统,无需安装多个视频监控摄像头,满足了海洋环境下大范围远距离监控的需求,在海域监控领域具有广阔的应用前景。

海上目标的检测和跟踪是海洋监控领域的一项关键技术。在海洋监控领域,为了保证足够的反应时间,一般要求在较远的距离下就能检测到舰船等目标。海域图像一般由海面、天空和海天天线 3 个区域组成。由于海上远景目标一般最先出现在海天天线上,提取海天天线可以划定远景目标最初出现的潜在区域,在海天线区域检测海上远景小目标,可以抑制海天天线区域外不必要的噪声干扰,同时大大缩减了目标检测时间,提高了检测效率,因此海天天线提取是海上远景小目标检测的基础。

常规视觉系统采集的海天线呈一条直线,文献[3-6]中的海天天线提取算法均是针对直线海天天线提出的。但折反射全景视觉传感器是基于双曲面折反射逆投影光学原理成像的,由于双曲面反射镜存在空间光域压缩效应,在扩大视野的同时会使全景图像出现显著的非线性畸变。所以常规图像中的直线海天天线在全景图像中呈近似圆形^[7],致使现有的直线型海天天线检测方法无法直接应用。另一方面,全景视觉系统成像原理的特殊性导致全景图像中除了包含场景环境信息外,还包括全景视觉系统(如保护罩、反射镜边框、摄像头及支架等设备)的成像,此外全景视觉系统通常安装在舰船或浮标上,故全景图像中还会包含船体或浮标成像。上述全景设备区成像增加了背景的复杂度,从而严重影响海天天线提取的准确性。

目前,文献中可见的提取全景海天天线的方法

很少,主要是基于椭圆拟合的海天线提取方法^[8]。该方法将低海况时手动测量得到的全景海天天线的圆心和半径作为先验知识,以此为依据设定 2 个同心圆环对海天天线附近区域进行遮挡,从而消除全景设备区成像对海天天线提取的不良影响,然后在最外边缘搜索的基础上通过椭圆拟合提取海天天线。但该算法在高海况下无法提取海天天线,这是因为根据先验知识手动设置的同心圆环的圆心位置是固定的,与高海况下海天天线的实际圆心有很大偏差(详细分析见后文)。

针对上述问题,并考虑到全景海天天线近似呈圆形的特点,本文提出了一种新的全景圆形海天天线提取算法。该方法通过计算分形维数自动地将全景图像中的全景设备区提取并分割出来,以消除其对海天天线检测的影响。然后设计了一种改进的 Hough 圆变换算法来有效提取全景海天天线。

2 基于分形维数的全景设备区提取

全景视觉传感器及其结构如图 1 所示。其结构和成像原理的特殊性导致由其采集的全景海域图像中包含有全景采集装置及船体等设备区成像,如图 2 所示。这大大增加了全景海域图像背景的复杂度,而且全景图像设备区成像还会对海天天线造成遮挡,导致海天天线断裂,从而增加了海天天线的提取难度。所以在进行海天天线提取之前,有必要进行全景设备区提取和分割,消除其对海天天线检测的不良影响。

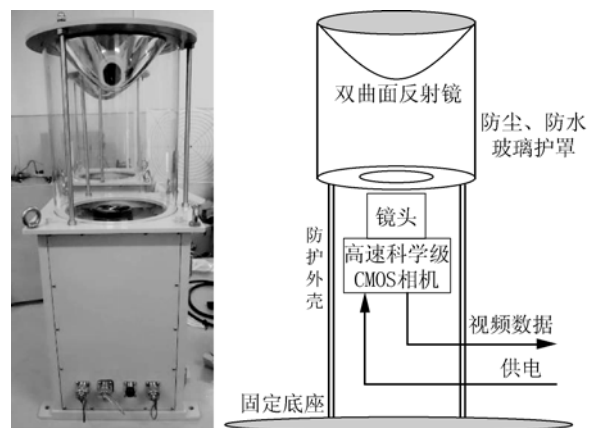


图 1 全景视觉传感器及结构图

Fig. 1 Panoramic vision sensor and its structure

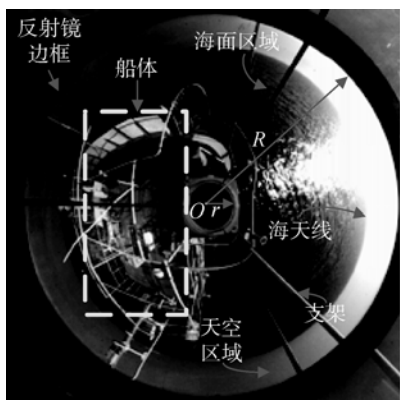


图 2 全景海域图像
Fig. 2 Panoramic sea image

从图 2 可以看到,当全景视觉系统固定后,只有该系统的相机固定设备中心 O 、相机固定设备的半径 r 和双曲面反射镜固定装置的半径 R 在全景图像中是固定不变的,可以将它们作为先验知识使用。而海天线圆心会随着海况的变化而变化,海天线半径也随之在 $r \sim R$ 之间移动,所以文献[8]中将低海况下手动测量的海天线圆心和半径作为先验知识,然而通过设定固定不变的同圆心圆环屏蔽全景设备区干扰的方式适应性较差,需要设计自适应性较高的全景设备区提取方法。

考虑到全景采集装置及船体设备均属于人造物体,其纹理特征与海面、天空等自然景物有明显区别,故本文根据分形原理,通过计算分形维数将全景设备区从海天背景中自动检测并分割出来,以降低背景复杂度,消除其对海天线检测的不良影响。

分形及分形维数^[9]由美国数学家 Mandelbrot 在 1975 年首次提出,研究表明,分形维数是分形对象复杂度和不规则度的定量描述。分形维数定量反映了图像表面的粗糙程度^[10],由于海天背景与全景采集装置及船体设备的表面粗糙度有所差别,它们所对应的分形维数也不同,因此可用分形维数作为区分标准。常用的提取分形维数的方法有地毯覆盖法和差分盒维数法^[11-12],由于地毯覆盖法的计算效果要优于差分盒维数法,故这里采用该算法计算图像的分形维数。

2.1 地毯覆盖法原理

地毯覆盖模型是在 Mandelbrot 提出的计算海岸线长度方法^[13]的基础上进行扩展,将计算海

岸线长度推广到图像的二维表面区域。该算法的思想是^[14]:将图像 $f(x, y)$ 看成是三维欧式空间的一个曲面,其中曲面上点的高度可以用该像素的灰度值表示,如果以该曲面中的某一点为中心,将与该中心点距离大于 r 的像素点集合用一个厚度为 $2r$ 的“地毯”进行覆盖,则该曲面的面积可由地毯上下表面之间的体积除以 $2r$ 得到。

在图像曲面中,地毯的上表面 $U(i, j, r)$ 和下表面 $B(i, j, r)$ 定义如下:

$$U_0(i, j) = B_0(i, j) = f(i, j), \quad (1)$$

其中 $f(i, j)$ 表示图像中点 (i, j) 位置的灰度值。

$$U_r(i, j) = \max\{U_{r-1}(i, j) + 1, \max_{(m, n) \in \eta} [U_{r-1}(m, n)]\}, \quad (2)$$

$$B_r(i, j) = \min\{B_{r-1}(i, j) - 1, \min_{(m, n) \in \eta} [B_{r-1}(m, n)]\}, \quad (3)$$

其中: $\eta = \{(k, h) \mid \text{distance}[(k, h), (i, j)] \leq 1\}$ 表示距离点 (i, j) 小于等于 1 的点的集合; $r = 1, 2, \dots, r_{\max}$, r_{\max} 是在计算分形维数时选取的最大尺度,要求 $r_{\max} \geq 2$ 且 $r_{\max} \in N$ 。

通过上下地毯表面的定义,可得到两个表面之间的体积:

$$V(r) = \sum_{(i, j) \in M} (U_r(i, j) - B_r(i, j)), \quad (4)$$

式中 M 表示所要处理的区域。则灰度曲面的面积 $A(r)$ 为:

$$A(r) = V(r) / 2r. \quad (5)$$

由于分形的自相似性,图像灰度曲面的面积度量 $A(r)$ 又可表示为:

$$A(r) = cr^{2-D}. \quad (6)$$

对上式两边取对数可得:

$$\log A(r) = (2-D)\log(r) + \log(c), \quad (7)$$

其中 c 为常数, D 为所要求取的灰度曲面的分形维数。

因此,分形维数 D 的具体算法为:对得到的一系列 r 和 $A(r)$, 分别求取 $\log r$ 和 $\log A(r)$, 然后在 $\log(r) \sim \log A(r)$ 坐标系中,用最小二乘法拟合直线 $\log A(r) = C_1 \log(r) + C_2$ 得到斜率 C_1 的值,从而得到分形维数 $D = 2 - C_1$ 。

2.2 基于分形维数的全景设备区提取

如果按照地毯覆盖法的一般步骤,通过计算图像中每一个像素点的分形维数再生成相应的分维图像来提取全景设备区域的话,则计算量大,计

算效率低。考虑到全景图像中对全景海天线检测影响较大的船体及图像采集设备分布比较集中,所占区域较大(见图 2 中长方形区域),因此本文设计了一种基于地毯覆盖法的全景设备区提取方法,该方法可以在减少计算量的同时,较完整地提取出全景设备区。具体步骤如下:

(1)考虑到包括船体在内的全景设备区大部分集中分布在一个区域,它们的属性相近,本文将大小为 256×256 的全景图像转化为灰度图像,并将其整体划分为 16×16 的图像窗口。采用地毯覆盖法计算每个窗口中心点的分形维数,并将其作为该图像窗口的分形维数,这样可得到一个 16×16 的分形维数矩阵,从而大大克服了逐点计算分形维数计算量大的问题。

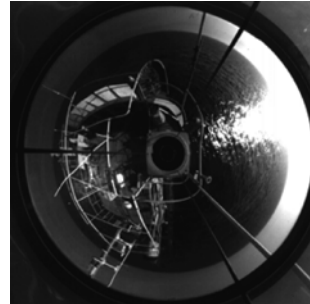
(2)分形维数的检测规则:考虑到自然背景相对粗糙,分形维数较大;人造物体由许多光滑的小块组成,它的各个组成部分比较规整,分形维数较小,但这些组成部分的连接处表现出较高的分形维数;在人造物体和自然背景交界处,边缘较强,分形维数很大^[15-16]。从图 2 可见,全景设备区自身的连接处很多,与海天背景交界也很多,其整体应该呈现较高的分形维数。故这里将步骤(1)中得到的分形维数矩阵中的元素进行降序排列,将排序位于总数 $1/3$ 位置处的分形维数作为阈值,分形维数大于该阈值的区域即为全景设备区。这种阈值确定方式是对不同全景设备,在不同海域、不同时间采集的大量全景图像进行试验得到的统计结果,由该方法确定的阈值可以使不同的全景海域图像的分形结果综合最优。

为了便于观察提取结果,把提取出来的全景设备区用矩形方框标记在原始全景图像中,如图 3 所示。从图 3(b)可以看出,大部分全景设备区已经被成功提取了出来。需要说明的是:

(1)由于反射镜边框纹理相对简单光滑,分形维数较小,故存在一定程度的漏检。可正如前文介绍的,全景视觉系统一旦确定,其反射镜边框的半径 R 是已知的并且固定不变,完全可以利用这个先验知识在海天线检测前将其剔除。

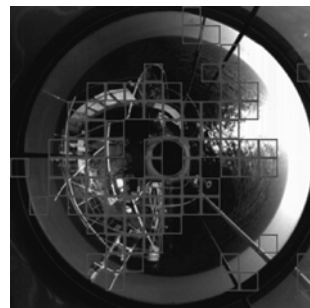
(2)从图 3(b)可以发现,部分光照的海面区域也被提取了出来,这是由于光照引起的鱼鳞光使得这部分海域与其它海域呈现较强的边缘特性,从而导致其分形维数较大。投射到海面上的

光照一直是影响海天线检测准确性的重要因素之一,所以消除这部分被提取出来的区域的影响恰恰是本文需要的。



(a) 原始图像

(a) Original image



(b) 地毯覆盖法检测结果

(b) Detection results of blanket-covering method

图 3 基于地毯覆盖法的全景设备区提取

Fig. 3 Panoramic equipment area extraction based on blanket-covering method

3 基于改进 Hough 圆变换的全景海天线提取算法

针对全景海天线呈近似圆形的特点,首先考虑采用检测圆形的方法提取海天线,常用的圆形检测算法有:标准 Hough 圆变换^[17]、随机 Hough 变换^[18]和基于梯度的 Hough 圆变换^[19]等。但这些算法应用于全景海天线提取时,检测准确率和效率都不理想,故本文提出了一种基于改进 Hough 圆变换的全景海天线提取算法。

3.1 梯度 Hough 圆变换原理

Hough 变换原理最早由 Paul Hough 在 1962 年提出,它的突出特点是将全局检测问题转化为判断参数空间累加值的问题,大大减小了检测复杂度。在将 Hough 变换应用于圆检测时,由于需要计算三维空间(中心点 (x, y) 、半径 r)的累加

值,从而使圆检测效率大大降低且需要消耗大量的内存。而由 Kimme 提出的基于梯度的 Hough 圆变换算法^[20]利用圆上各点梯度所在直线过圆心的特点,先寻找候选圆心,然后遍历所有候选圆心确定圆半径,把直接的三维空间映射改进为在二维空间上的累加,减少了计算量,提高了计算效率。该算法的具体步骤为:

(1)对图像进行 Canny 边缘检测,得到边缘二值图像。

(2)对边缘图像上的每一个非零点计算局部梯度和梯度方向。图像 $f(x, y)$ 在点 (x, y) 处的梯度为:

$$\nabla f = (G_x, G_y)^T = \left[\frac{\partial f}{\partial x}, \frac{\partial f}{\partial y} \right]^T. \quad (8)$$

梯度方向为:

$$\theta(x, y) = \arctan \left[\frac{G_x}{G_y} \right]. \quad (9)$$

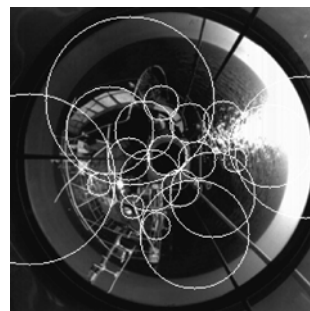
对过点 (x, y) ,斜率为 $\tan\theta(x, y)$ 的直线上的每一个点在累加器中进行累加统计,把累加结果大于给定阈值且是局部极大值的点作为候选圆心,并将这些候选圆心按照对应的累加值的大小进行降序排列。

(3)对每一个候选圆心,在与其对应的候选半径中选择非零边缘点最支持的半径作为该圆心的匹配半径。具体方法是:对某个候选圆心对应的一组候选半径,手动设置一个阈值,将构成半径的非零边缘点数大于该阈值的那些候选半径筛选出来,这些半径中最小的那个半径被认为是与该圆心对应的最优半径。此外,当两个候选圆心的距离小于给定的圆心间最小距离时,舍弃累加值小的候选圆心,最后输出每个候选圆心对应的最优半径。

按照上述步骤,将梯度 Hough 圆变换算法直接用于全景海天线检测,以图 3(a)中的全景图像为例,结果如图 4(a)所示。从图 4(a)的检测结果可以看出,该方法检测到多个圆环,但没有任何一个收敛到海天线上。这是因为 Hough 圆变换一般适用于背景比较“干净”的图像,而全景图像背景复杂,其边缘二值图像中属于船体和采集设备的边缘点严重影响了最优圆心和半径的确定,这正是需要进行全景设备区提取和剔除的原因。

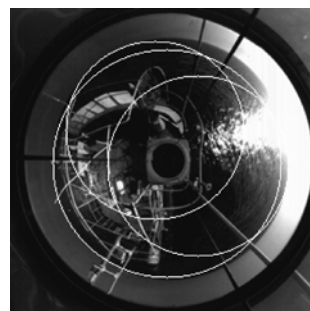
当根据分形维数将复杂的全景设备提取并剔除之后,再次利用基于梯度的 Hough 圆变换检测

全景海天线,其结果如图 4(b)所示。从图 4(b)可以看出,检测出的圆形数目虽然明显减少,但检测结果仍不唯一,而且全景海天线仍然没有被检测出来。通过分析发现,基于分形维数的全景设备区提取过程虽然降低了全景图像背景的复杂度,但仍有极少部分设备区漏检,但更主要的是梯度 Hough 圆变换算法中缺少了选择唯一圆环的过程,为此,本文提出了一种改进的 Hough 圆变换算法。



(a)直接检测结果

(a) Direct detection result



(b)去除设备区干扰后的检测结果

(b) Detection result after removal interference

图 4 梯度 Hough 圆变换检测结果

Fig. 4 Detection results by gradient Hough circle transformation

3.2 改进 Hough 圆变换提取全景海天线

本文提出的基于分形维数和改进 Hough 圆变换算法的具体实现步骤如下:

(1)采用自适应阈值的 Canny 算子对如图 3(a)所示的全景图像进行边缘检测,所得边缘二值图像如图 5(a)所示。

(2)剔除干扰边缘点。为了减少像素点分形维数的计算量,提高计算效率,本文采用先整体后局部的方法计算二次分形维数。在最大限度消除干扰边缘点的同时尽可能使计算量达到最小,计算过程如下:

① 将全景图像转换为灰度图像,然后按照

2.2 节中所述方法在灰度图像中进行分形维数计算,根据分维结果确定出全景设备区的位置,然后在二值图像 5(a)中把相应位置的非零边缘点的像素值设置为零,结果如图 5(b)所示。

② 剔除相机固定装置和双曲面反射镜固定装置形成的干扰边缘。如前所述,全景采集装置一旦选定并安装完毕,相机固定设备的中心 O 和半径 r 、双曲面反射镜固定装置的半径 R 均是固定不变的先验知识,因此可以通过设定同心圆环剔除相机固定装置和双曲面反射镜固定装置的干扰边缘点,结果如图 5(c)所示。这样处理不仅可

以提高第二次边缘点分形维数计算的效率,而且加速了 Hough 圆变换筛选最优半径的进程。

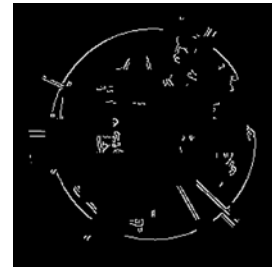
③ 二次分维计算。根据步骤②处理后保留下来的边缘点,在灰度图像中找出对应位置的点,在灰度图像中逐点计算以这些点为中心,大小为 16×16 窗口的分形维数,并对所有的分形维数按由大到小进行排序,将排序位于总数 $1/3$ 位置处的分形维数作为阈值,在图 5(c)中设置分形维数大于该阈值的点的像素值为零,结果如图 5(d)所示。由图 5(d)可见,全景设备的干扰边缘点已经基本消除,但较好地保留了海天线的边缘点。



(a) 边缘检测图
(a) Edge detection image



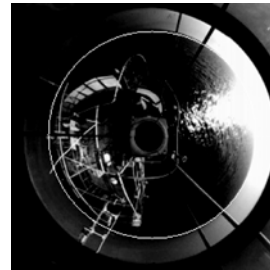
(b) 初次分维处理结果
(b) Initial fractal dimension result



(c) 去除先验干扰结果
(c) Result of prior interference removal



(d) 第二次分维处理结果
(d) Second fractal dimension result



(e) 海天线检测结果
(e) Detection result of proposed method

图 5 改进 Hough 圆变换的检测结果

Fig. 5 Detection results of improved Hough transformation

(3) 候选圆心的选择。对图 5(d)中的每一个非零边缘点按照公式(8)和公式(9)计算其局部梯度 ∇f 和梯度方向 $\theta(x, y)$ 。当全景设备固定后,所采集的全景图像中海天线的半径随着海天线圆心的变化在 $r \sim R$ 之间移动,因此为了克服无关点的干扰,提高检测效率,在按照 3.1 节步骤(2)寻找候选圆心的过程中,只取斜率为 $\tan\theta(x, y)$ 的直线上距离点 (x, y) 在 $r \sim R$ 之间的点进行累加,相比于原算法,这样的处理可以大大减少无关边缘点的干扰,增加候选圆心点的可信度。

(4) 确定最优圆心和半径。由于每个候选圆心都能找到相应的最支持的圆半径构成候选圆,这样势必会得到多个候选圆,如图 4(b)所示,因此需要有一个标准从这些候选的圆中选出最优的圆作为海天线。这个标准就是:

$$T = \frac{\text{圆环边缘点的数目}}{\text{半径}} \quad (10)$$

圆环边缘点的数目与半径的比值 T 兼顾了边缘点的数目和圆的尺寸,其大小可以作为判断圆环优劣的标准。确定最优圆心和半径的具体步

骤为:遍历所有候选圆心,计算每一个候选圆心对应不同半径时非零边缘点的数目,然后计算边缘数目与半径的比值 T ,按照比值 T 的大小把相应的半径降序排序,选择比值最大的半径作为该候选圆心最支持的半径,构成候选圆,最后在这些候选圆中再次选择比值最大的半径作为海天线圆环的唯一输出。考虑到海天线半径在 $r \sim R$ 之间,故在上述处理过程中对每一个候选圆心只需计算 $r \sim R$ 之间的半径对应的比值即可,这样不仅可以减少计算量,同时提高了检测结果的准确性。其检测结果如图 5(e)所示。

4 实验对比及分析

由图 5 可以看出,本文提出的方法可以有效地提取全景图像中的圆形海天线。为了进一步验证算法的有效性和鲁棒性,将对本文算法与文献 [8]算法在多种情况下进行海天线提取试验及对比分析,试验结果如图 6 所示。本文的试验是在 PC 上进行的,其配置为英特尔 Pentium (R) G2020 处理器,2.90 GHz 的 CPU 频率,3.47 GB 的内存,Windows XP 的操作系统。

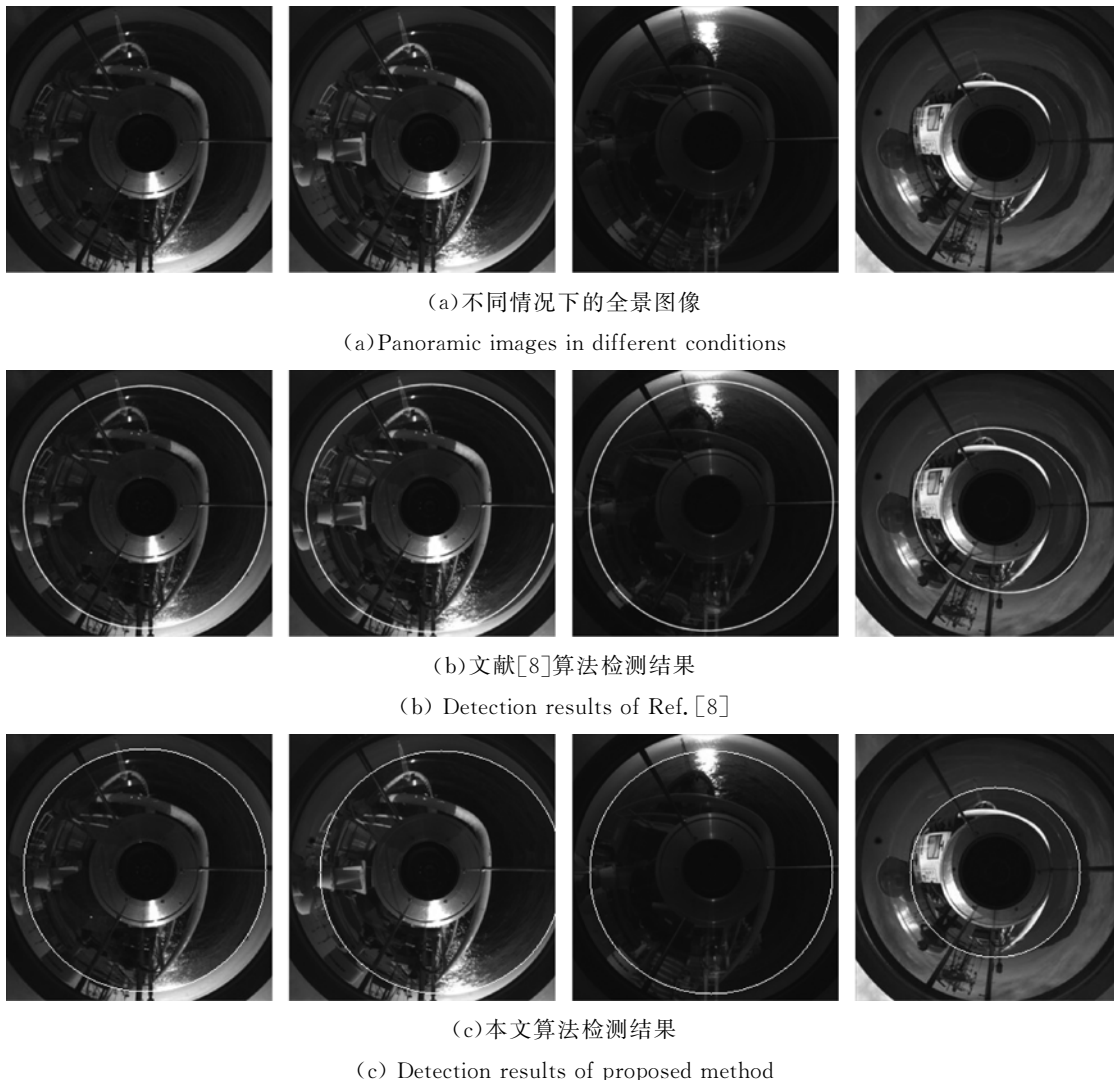


图 6 不同情况下的全景海天线检测

Fig. 6 Panoramic sea-sky-line extraction in different conditions

4.1 实验图片说明

图 6(a)中从左至右依次给出了“理想情况、海天线部分缺失、低对比度和海天线大范围断裂”这 4 类全景海域图像：“理想情况”是指在低海况下、能见度较好的白天拍摄的全景海域图像；“海天线部分缺失”是指在高海况下拍摄的全景海域图像，由于全景采集设备受风浪影响随船体晃动比较严重，导致部分海天线超出视域范围，出现海天线部分缺失的情况；“低对比度”是指黄昏时分光照不佳时采集的全景海域图像，此时海面和天空对比度较低，而且夕阳投射在海面上形成大片鱼鳞光；“海天线大范围断裂”是指海天线附近存在岛屿、岩礁等大的障碍物，造成海天线大范围的遮挡和断裂时的全景图像。

4.2 实验结果对比及分析

在上述 4 种情况下，文献[8]算法和本文算法的实验结果分别如图 6(b)和图 6(c)所示，由图可见：在“理想情况”下，文献[8]和本文方法均可以准确检测出全景圆形海天线；在“海天线部分缺失”的情况下，文献[8]方法提取海天线失败，这是因为高海况引起的船体晃动导致海天线的中心严重偏离了理想情况下全景海天线中心，使得文献[8]使用固定的圆心和半径屏蔽全景设备区干扰信息时，海天线的部分有效边缘点也会被屏蔽掉，从而导致检测出的海天线不准确；而本文方法通过分维计算消除全景设备区干扰，通过改进 Hough 圆变换提取全景海天线，整个检测过程不受海天线中心变动的影 响；在“低对比度”情况下，文献[8]方法检测海天线失败。这是因为在这种情况下采集的图像中，海面区域和天空区域的对比度较低，而且海天线附近海面存在光照形成的鱼鳞光，此外海天线附近的天空区域还存在落日的高亮度成像。这时文献[8]中使用固定的圆心和半径屏蔽干扰信息的方法，不能将海天线附近的光照影响全部消除，用于拟合的边缘点中存在许多光照影响引起的伪边缘点，从而使检测结果在鱼鳞光附近明显偏离海天线的真实位置；而本文方法根据分维计算结果消除无关干扰，可有效提取出受光照影响的区域，消除干扰边缘，从而准确检测出全景海天线；在“海天线大范围断裂”情况下，文献[8]方法检测海天线失败。在该组图像

中，海天线左侧至少三分之二的部分被全景设备及船体成像遮挡，同时海天线右侧存在大范围山体遮挡，应用文献[8]方法处理时边缘检测图中会包含山体和天空交界的边缘点，这些伪边缘点的存在使得拟合出的海天线出现严重偏差。而本文算法在选择最优圆心和半径的过程中能够有效排除上述伪边缘点，得到准确的检测结果。

为了进一步验证本文算法的优越性和普适性，在上述 4 种情况下分别随机挑选 100 幅图片进行试验，并将文献[8]和本文算法的错误检测结果进行统计，如表 1 所示。从表 1 可以看出在海天线部分缺失、低对比度和海天线大范围断裂的情况下，本文算法误检率远远低于文献[8]算法。结合表 1 对 400 幅全景海域图像进行了统计验证，结果表明：本文算法对单帧全景图像的处理时间为 0.632 s，且全景海天线的平均检测准确率达到 95.75%。

表 1 全景海天线误检率统计

Tab.1 Error detection statistics of panoramic sea-sky-line extraction

实验图片	文献[8]检测 准确率/%	本文方法 检测准确率/%
理想情况	94	97
海天线部分缺失	80	95
低对比度	54	97
海天线大范围断裂	33	94

5 结 论

本文针对全景海域图像背景复杂且海天线呈近似圆形的特点，提出了一种基于分形维数和改进 Hough 圆变换的全景海天线提取方法。该方法首先利用地毯覆盖法计算全景海域图像的分形维数，根据分维结果将全景图像中复杂的全景设备区干扰和阳光直射形成的鱼鳞光提取并分割出来，然后利用提出的改进 Hough 圆变换算法提取全景图像中的圆形海天线。大量实验结果表明，本文算法在理想情况、海天线部分缺失、低对比度和海天线大范围断裂等多种情况下，均能实现全景海天线的准确提取，准确率达到 95.75%，算法具有良好的适用性和鲁棒性。

参考文献:

- [1] 陶宏江,金龙旭. 基于各向异性插值的全景图像径向展开算法[J]. 液晶与显示, 2014, 29(3): 435-440.
TAO H J, JIN L X. Unwrapping algorithm based on panoramic image of anisotropic interpolation radial[J]. *Liquid Crystals and Displays*, 2014, 29(3):435-440. (in Chinese)
- [2] 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.
MA X L, FENG Y, CAO Y. Concave hyperboloidal catadioptric omnidirectional imaging system[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(8): 2132-2136. (in Chinese)
- [3] 曾文静,万磊,张铁栋,等. 复杂海空背景下弱小目标的快速自动检测[J]. 光学精密工程, 2012, 20(2):403-412.
ZENG W J, WAN L, ZHANG T D, et al.. Fast detection of weak targets in complex sea-sky background[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 20(2): 403-412. (in Chinese)
- [4] PU H, BO L, REN T T, et al.. A fast sea-level line extraction and object detection method for infrared sea image[C]. *International Symposium on Optoelectronic Technology and Application, Beijing, P. R. China; SPIE*, 2014, 9300:930007. 1-930007. 7.
- [5] BO L, REN T T, LIU Y B, et al.. Sea-level line extraction based on piecewise line detection[C]. *International Symposium on Optoelectronic Technology and Application, Beijing, P. R. China; SPIE*, 2014, 9301: 93013L. 2-93013L. 8.
- [6] 梁世花,吴巍,李波,等. 基于 Seam Carving 的海天线检测算法[J]. 红外与激光工程, 2013, 42(10): 2817-2821.
LIANG SH H, WU W, LI B, et al.. Sea-sky-line detection algorithm based on Seam Carving[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(10):2817-2821. (in Chinese)
- [7] 英向华. 全向摄像机标定技术研究[D]. 沈阳:中国科学院自动化研究所, 2004.
YING X H. *Study on the Technique of Omnidirectional Camera Calibration* [D]. Shenyang: Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, 2004. (in Chinese)
- [8] 苏丽,周娜,徐从营. 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, 陕西西安, 中国, 2013.
SU L, ZHOU N, XU C Y. On the small ship target detection based on panoramic vision [C]. *Proceedings of the 32nd Chinese Control Conference, Xi'an, P. R. China; CCC*, 2013. (in Chinese)
- [9] MANDELBROT B B. *The Fractal Geometry of Nature* [M]. New York: W H Freeman and Company, 1982: 102-113.
- [10] 伍妍妮,潘炼,王薇. 基于分形特征的复杂环境目标检测方法研究[J]. 计算机测量与控制, 2014, 22(5):1327-1329.
WU Y N, PAN L, WANG W. A research of moving target detection under complex background based on fractal feature [J]. *Computer Measurement & Control*, 2014, 22(5): 1327-1329. (in Chinese)
- [11] 耿庆田,赵宏伟. 基于分形维数和隐马尔科夫特征的车牌识别[J]. 光学精密工程, 2013, 21(12): 3219-3204.
GENG Q T, ZHAO H W. License plate recognition based on fractal and hidden Markov feature [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013, 21(12):3219-3204. (in Chinese)
- [12] 于海晶,李桂菊. 基于改进差分盒维数的烟雾分割方法[J]. 液晶与显示, 2013, 28(1):115-119.
YU H J, LI G J. Smoke segmentation method based on improved differential box-counting fractal dimension [J]. *Liquid Crystals and Displays*, 2013, 28(1):115-119. (in Chinese)
- [13] 刘洋,田小建,王晴,等. 采用局部分形的高效图像分割方法在红外云图处理中的应用[J]. 光学精密工程, 2011, 19(6):1367-1374.
LIU Y, TAN X J, WANG Q, et al.. Application of efficient image segmentation method based on local fractal in the infrared cloud image processing [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(6): 1367-1374. (in Chinese)
- [14] 张心心,顾静良,何山,等. 基于分形曲面尺度斜率特征的弱小目标检测[J]. 激光与红外, 2015, 45(3):331-334.
ZHANG X X, GU J L, HE SH, et al.. Dim target detection based on the scale slope feature of

- fractal surface [J]. *LASER & INFRARED*, 2015, 45(3):331-334. (in Chinese)
- [15] 蔡飞, 涂丹. 可见光图像人造目标检测技术综述 [J]. *计算机应用研究*, 2010, 27(7):2430-2434.
CAI F, TU D. Survey on man-made object detection in visible imagery [J]. *Application Research of Computers*, 2010, 27(7):2430-2434. (in Chinese)
- [16] 诸葛霞, 向健勇. 基于分形的实现小目标检测的一种具体方法 [J]. *红外技术*, 2006, 28(7):411-414.
ZHU G X, XIANG J Y. A little target detecting method based on fractal [J]. *Infrared Technology*, 2006, 28(7):411-414. (in Chinese)
- [17] MURAKAMI K, ABOSHI M, KINOSHITA K. Fast line detection by Hough transform using inter-image operations [J]. *Electronics and Communications in Japan*, 2015, 98(7):1-12.
- [18] WEI L L, ZHANG X L, FAN L. A TBD algorithm based on improved Randomized Hough Transform for dim target detection [C]. *Proceedings of the 2010 2nd International Conference on Signal Processing Systems, Dalian, P. R. China: ICEMS*, 2010:V2-241-V2-245.
- [19] 程鹏, 朱美琳, 耿华. 一种基于梯度 Hough 变换和 SVM 的圆检测算法 [J]. *计算机与现代化*, 2013, 2(5):22-26.
CHENG P, ZHU M L, GENG H. Circle detection algorithm based on gradient Hough transform and SVM [J]. *Computer and Modernization*, 2013, 2(5):22-26. (in Chinese)
- [20] KIMME C, BALLARD D H, SKLANSKY J. Finding circles by an array of accumulators [J]. *Communications of the Association for Computing Machinery*, 1975, 18(2):120-122.

作者简介:



庞迪(1989—),女,河南南阳人,硕士研究生,2013年于河南理工大学获得学士学位,主要从事数字图像处理、机器视觉检测等方面的研究。E-mail: pangdi08tx@126.com

导师简介:



苏丽(1976—),女,黑龙江哈尔滨人,博士,副教授,硕士生导师,1999年于哈尔滨工程大学获得学士学位,2002年于哈尔滨理工大学获得硕士学位,2006年于哈尔滨工程大学获得博士学位,主要从事数字图像处理、机器视觉检测技术、生物特征识别与智能监控等方面的研究。E-mail: suli406@hrbeu.edu.cn

(本栏目编辑:李自乐)

(版权所有 未经许可 不得转载)