

# 多特征融合红外舰船尾流检测方法研究

邹娜 田金文

(华中科技大学自动化学院多谱信息处理技术国防科技重点实验室 武汉 430074)

**摘要** 针对舰船热尾流红外图像易受海杂波干扰、对比度偏低,传统方式无法对其进行识别的问题,提出一种基于 Gabor 滤波组和局部信息熵特征融合的红外舰船尾流检测算法。首先,应用灰度共生矩阵计算尾流与海面背景的对比如,判断该区域是否存在舰船尾迹,并提取出感兴趣区域以提高算法后续处理速度;其次,将多方向 Gabor 滤波器和局部信息熵两种纹理进行特征融合,实现舰船尾流特征增强;最后,经阈值分割、Hough 变换实现红外舰船尾迹检测。实验结果表明,该方法能够有效地保留舰船尾流的纹理特征和细节,准确地提取完整的尾流边缘,从而大大提高检测率。

**关键词** 舰船尾流检测, Gabor 滤波, 局部信息熵, 灰度共生矩阵, 霍夫变换

中图分类号 TP751.1 文献标识码 A

## Research on Multi Feature Fusion Infrared Ship Wake Detection

ZOU Na TIAN Jin-wen

(National Key Laboratory of Science and Technology on Multi-spectral Information Processing Technology, School of Automation, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

**Abstract** A new algorithm of infrared ship wake detection based on fusion of Gabor filter and local information entropy was proposed to solve the problem that the infrared image of ship wake is easily disturbed by the sea clutter, the contrast is low, and the image can not be identified by the traditional method. First of all, the contrast between the wake and the sea background is calculated by using the gray level co-occurrence matrix to determine whether there is a ship wake in the region, and the region of interest is extracted to improve the processing speed of the algorithm. Secondly, multi-direction Gabor filter and local information entropy are used for feature fusion to realize the feature enhancement of ship wake. Finally, the infrared ship wake detection is realized by threshold segmentation and Hough transform. Experimental results show that this method can effectively preserve the texture features and details of ship wake, and accurately extract the complete wake edge, which greatly improves detection rate.

**Keywords** Ship wake detection, Gabor filtering, Local information entropy, Gray level co-occurrence matrix, Hough transform

## 1 引言

舰船目标是海上监测和战时打击的重点,能否准确、实时地定位跟踪舰船目标,直接关系到战斗成败。随着消声技术、红外隐身技术的大规模应用,传统的探测装置难以实现对舰船目标的监测。舰船在海上行驶所形成的尾流区域绵延数百甚至上千米,在红外图像中主要呈现为具有一定宽度的渐变湍流尾迹和窄“V”型开尔文尾流<sup>[1]</sup>特征,因而可以将舰船尾流作为研究目标,通过识别红外图像中的尾流,实现舰船位置的确定与运动参数的估计。红外舰船尾流检测易受光照、烟雾、海杂波干扰,存在误检、漏检的情况,如何排除干扰、克服缺陷并高精度地检测舰船尾流已成为国内外的研究热点。

目前,舰船尾流识别主要有边缘检测<sup>[2]</sup>与几何特征分析等方式。边缘检测算子大多采用 Canny 算子,检测过程分为以下几个步骤:首先定位尾流边缘,再将边缘点连接成尾流轮廓形成分割区域,最终通过阈值分割将尾流和海洋背景分开。文献[3]对红外舰船图像进行动态纹理分割,结合 Canny 算子进行边缘检测,应用数字形态学进行膨胀、标记和选择,但

该方法可能出现边缘误检。文献[4]对 Canny 算法中的高斯滤波器权值进行改进,识别准确度有所提高,但运算量较大。

由于舰船尾流可以近似为线性特征,可以在某些角度和方向上对能量进行累积,因此可采用 Hough 变换<sup>[5]</sup>、Radon 变换<sup>[6]</sup>对红外尾流特征进行提取,得到统计信息并完成对舰船尾流的定位。文献[7]利用随机 Hough 变换实现像素点的随机采集,大大减小了传统 Hough 变换的计算量,但在复杂场景下,其会导致无效采样和累积,算法性能较差。因此本文提出了一种基于 Gabor 滤波组和局部信息熵特征融合的尾流检测算法,从尾迹区域判别、纹理增强算法两个角度对红外舰船尾迹进行分析,在处理效率和时间复杂度上实现平衡。实验结果表明,该方法具有良好的检测效果。

## 2 基于纹理特征的舰船尾迹区域提取

红外传感器获得的尾流图像中通常含有大片海面区域,这极大地增加了尾迹特征提取的运算量。通过对红外舰船尾流形成的机理进行分析,可利用尾流纹理特征<sup>[8]</sup>进行尾流区域筛选,提取出感兴趣区域(Region Of Interest, ROI),以加快

后续算法的处理速度。

灰度共生矩阵 (Gray Level Co-occurrence Matrix, GL-CM) 可对尾迹的纹理特征进行描述,在纹理分析方面有着广泛应用。根据纹理的粗糙性和方向性检测水面区域是否存在舰船尾迹,可进一步确定尾迹所在位置,为估算舰船目标的航向、航速奠定基础。

### 2.1 灰度共生矩阵

灰度共生矩阵  $G(i, j, d, \theta)$  是一个关于像素之间距离和角度的矩阵,其描述了一对灰度值为  $i, j$  的像素,在相距为  $d$  个像素、角度为  $\theta$  的方向上出现的次数总和。矩阵的大小与量化的灰度级有关,不同灰度共生矩阵元素值差异较大,为了统一量纲,需要将灰度共生矩阵  $G(i, j, d, \theta)$  归一化,得到概率  $P(i, j, d, \theta)$ :

$$P(i, j, d, \theta) = G(i, j, d, \theta) / N \quad (1)$$

其中,  $N$  为灰度共生矩阵元素之和。

由灰度共生矩阵可以计算出对比度、相关性、能量、同质性、熵等参数,用来定量描述图像的纹理特征。对比度是灰度分布均匀性度量,计算公式如下:

$$CON = \sum_{i=1}^K \sum_{j=1}^K (i-j)^2 P(i, j, d, \theta) \quad (2)$$

其中,  $K$  为量化的灰度阶数。当纹理基元为恒定灰度值时,对比度为 0,分布越不均匀,对比度越大。

### 2.2 基于 GLCM 的尾迹区域的判断

图 1 给出了 3 种不同对比度的红外舰船尾迹图。利用灰度共生矩阵计算尾迹和海浪对比度,将尾迹的灰度等级  $K$  划分为 32 级,步长  $d$  设置为 1,分别计算  $\theta=0$  和  $\theta=\pi/2$  情况下的对比度 ( $ConH/ConV$ )。表 1 给出了尾迹与海浪对比度的实验数据。

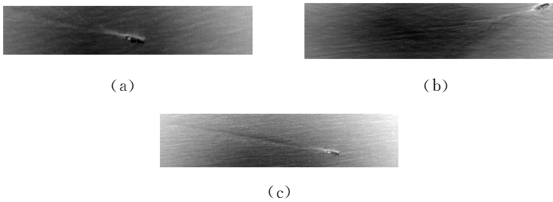


图 1 红外尾迹区域示意图

表 1 尾迹与海浪的对比度

	尾迹 a	尾迹 b	尾迹 c	海浪 1	海浪 2
$ConH$	0.8402	1.1801	1.0182	4.2443	1.4321
$ConV$	1.6862	2.3435	2.4868	1.6737	0.6186

实验结果表明,尾迹纹理在灰度共生矩阵取  $0^\circ$  和  $90^\circ$  时得到的对比度比值 ( $ConH/ConV$ ) 均小于 1,而海浪图像的对比度比值 ( $ConH/ConV$ ) 均大于 1。若图像顺时针旋转  $90^\circ$ ,所得结论相同,因此可通过对比度判断待检测区域是否有红外尾迹,若不含尾迹纹理,将此区域舍弃;若含有尾迹纹理,提取出感兴趣区域 (ROI),能够大幅提高后续算法的处理速度。

## 3 基于 Gabor 滤波组和局部信息熵特征融合的尾流检测算法

### 3.1 多方向 Gabor 滤波纹理增强

研究表明,二维 Gabor 滤波器能很好地拟合视网膜简单细胞的多尺度和多方向选择等特性,可以对人类视觉响应进行模拟,因而二维 Gabor 滤波器可广泛地应用于计算机视觉纹理分割。二维 Gabor 滤波器的表达形式为:

$$G_{\sigma, \gamma, \theta, \lambda, \phi}(x, y) = \exp\left(-\frac{x_0^2 + \gamma^2 y_0^2}{2\sigma^2}\right) \cos\left(2\pi \frac{x_0}{\lambda} + \phi\right) \quad (3)$$

$$x_0 = x \cos \theta + y \sin \theta \quad (4)$$

$$y_0 = -x \sin \theta + y \cos \theta \quad (5)$$

其中,  $\sigma$  表示 Gabor 滤波器高斯部分的标准差,决定了小波的带宽;  $\gamma$  代表空间方向比,控制小波支撑区域的椭圆率;  $\lambda, \theta, \phi$  分别代表 Gabor 滤波器余弦部分的波长、方向和相位偏移量。

滤波过程是将输入图像  $I$  与 Gabor 滤波器  $G$  进行卷积,可表示为:

$$F = I \otimes G \quad (6)$$

实际尾流检测中,存在海面背景复杂、海杂波强弱差别大等情况,这会对尾迹纹理提取造成影响。同时,舰船目标的航行方向不同,导致尾迹的方向各不相同,单一 Gabor 滤波器很难完成复杂情况下的检测任务。因此需要设计一组参数不同的 Gabor 滤波器,以适应不同情况下目标特征提取的需求。考虑到 Gabor 滤波器具有对偶特性,不同方向的 Gabor 滤波器对于尾迹特征提取贡献不同的特点,同时为减少计算量并提高算法效率,在  $0^\circ \sim 180^\circ$  范围内采样,方向参数取值如下:

$$\theta = \{0, \frac{\pi}{4}, \frac{\pi}{2}, \frac{3\pi}{4}\} \quad (7)$$

由于尾流区域与背景的相对亮度存在不确定性,采用多相位 Gabor 滤波器进行滤波,得到每个相位对应的特征图,并采用求和方式将不同相位的特征图进行融合,得到尾迹特征在所有相位下的特征和,融合公式可表示为:

$$F_\varphi = \sum_{k=1}^n I G_{\sigma, \phi_k} \quad (8)$$

对融合后的特征图进行归一化,图像  $(i, j)$  处的像素值可表示为:

$$F(i, j) = \frac{F_\varphi(i, j) - \min(F_\varphi)}{\max(F_\varphi) - \min(F_\varphi)} \quad (9)$$

为检验 Gabor 滤波器组对舰船尾流的检测效果,实验对输入图像 (如图 2 所示) 求取  $0^\circ, 45^\circ, 90^\circ$  和  $135^\circ$  4 个相位角度的特征图,实验参数取值为:  $\lambda=7, \sigma=8, \gamma=2, \phi=0$ , 滤波窗口大小为  $5 \times 5$  像素,滤波结果如图 3 所示。将不同角度的特征图进行融合,得到如图 4 所示的检测结果。实验结果表明,相较于各相位的特征图,多相位融合后的特征图效果明显增强。

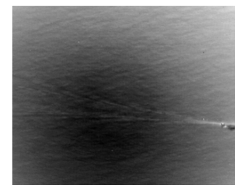


图 2 原始尾流图像

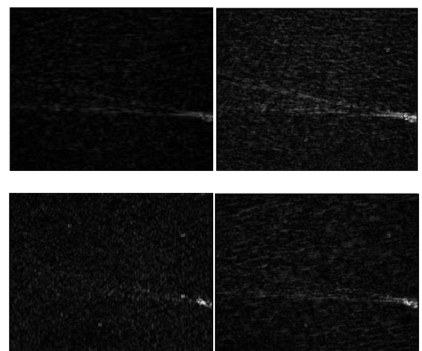


图 3 滤波器方向  $\theta$  为  $0^\circ, 45^\circ, 90^\circ, 135^\circ$  时的滤波结果

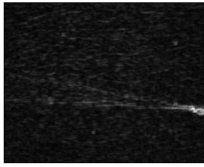


图4 多方向 Gabor 特征融合

为了更好地验证 Gabor 滤波器对尾流纹理特征增强的作用,对比传统的自适应阈值分割方法,得到如图 5 所示的分割图。结果表明,在复杂背景下传统方法不能实现目标与背景的有效分离,无法得到完整、准确的尾流检测结果。



图5 原始图像 Otsu 阈值分割

### 3.2 基于局部信息熵的尾流增强算法

由美国科学家提出的信息熵理论可完成信息定性与定量描述,目前已经在图像处理研究中得到广泛应用。信息熵是对当前区域灰度值变化的随机性度量,当区域中各个灰度级出现的概率相等时,信息熵  $e$  的值最大,熵越小,表示的信息量越大,可定义为:

$$e = - \sum_{i=0}^{L-1} p(z_i) \log_2 p(z_i) \quad (10)$$

$$p(z_i) = \frac{N(z_i)}{\sum_{i=0}^{L-1} N(z_i)} \quad (11)$$

其中,  $p(z_i)$  表示当前区域中灰度级为  $z_i$  的概率。

在舰船红外尾流检测中,熵特征描述了尾流的灰度变化,因此,在多方向 Gabor 滤波纹理增强中引入局部信息熵特征可更好地对尾流特征进行描述。统计图像中每个灰度级出现的概率,以各像素点为中心,选取  $9 \times 9$  窗口,计算得到局部熵。局部熵是局部窗口内所有像素点共同作用的结果,对单点噪声不敏感,具有明显的抗噪作用。

多个特征图的融合方式包括平均值融合、最大值融合、乘积融合、加权融合等方式。各种融合方式针对不同特征图同一位置的相应像素值进行。对于特征图  $S_1, S_2, \dots, S_N$ , 像素  $(i, j)$  处的融合值为:

$$S(i, j) = F(S_1(i, j), S_2(i, j), S_3(i, j), \dots, S_N(i, j)) \quad (12)$$

其中,  $F$  为取最大值、取平均值、取乘积或加权算子。

针对红外舰船尾流纹理特征,考虑 Gabor 滤波与信息熵检测算法的特点,采用加权算子进行特征融合,两种特征的权重系数为 1:1,其可最大程度地增强尾流纹理特征,适用于低对比度条件下的特征提取。

### 3.3 算法流程

红外舰船尾流图像易受椒盐噪声影响,中值滤波对这类随机噪声具有良好的过滤作用,但滤波器尺寸和形状等参数直接关系到算法的运行效果。为了达到抑制噪声和加快算法处理速度的目的,本文采用  $3 \times 3$  的方形中值滤波算子进行处理。

在目标与背景对比度低的场景下,边缘检测方法难以检

测到完整的尾流边缘。本文利用尾流的纹理特征,通过无效区域去除、多方向 Gabor 特征叠加、局部信息熵与多方向 Gabor 特征融合、尾流特征二值化处理、Hough 变换检测直线等几个步骤得到尾流检测结果。尾流检测的流程如图 6 所示。

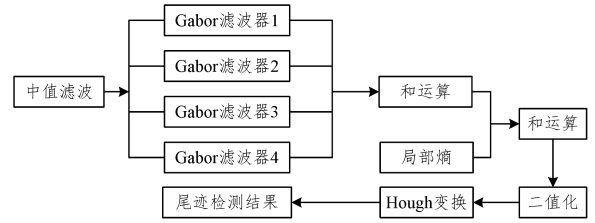


图6 尾流检测流程

## 4 实验结果及评估

为验证所提红外舰船尾流检测算法的有效性,在 MATLAB R2014a 环境下进行实验。采用基于 Canny 算子的边缘检测和基于 Hough 变换的尾流检测算法进行对比实验。选取 640 张实际红外图像进行测试,实验图像大小为  $320 \times 256$ ,其中 540 张为包含目标的正样本,490 张为典型开尔文尾流,50 张为典型湍流尾迹图像,涵盖了不同对比度、进入方位角、夹角的尾流及海杂波干扰等情形;另外 100 张为不包括尾流目标的图像,场景包含海天背景、海面背景及舰船小目标等。部分检测结果如图 7 所示。

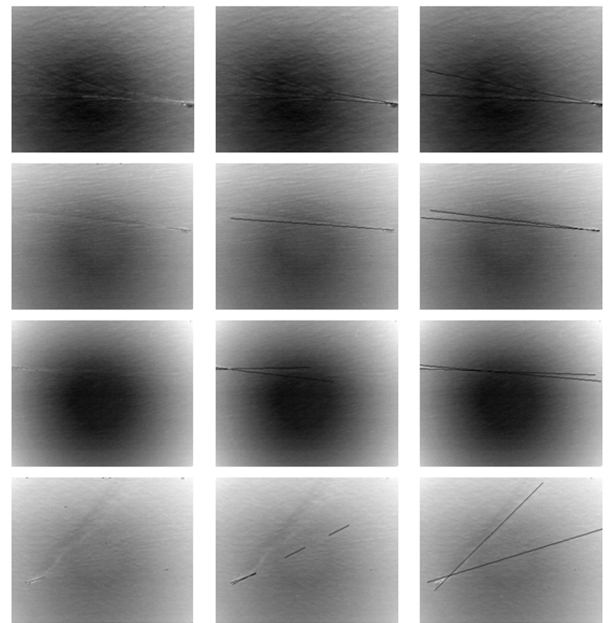


图7 常用尾流检测算法对比

图7 常用尾流检测算法对比

实验结果表明:本文算法提取的舰船尾流准确、完整,且较好地抑制了海面噪声,具有较高信噪比;在图像对比度低、含有大量海杂波噪声的情况下,均可得到很好的检测效果。

为了定量比较各个算法的检测效果,采用识别率、虚警率作为评价指标。对于一组红外图像,人工标记的目标个数为  $TP$  (True Positives),经过检测算法检测为目标的对象中,真实目标数为  $DTP$  (Detected True Positives),虚假目标数为  $DFP$  (Detected False Positives)。则识别率定义为:

$$P_d = \frac{DTP}{TP} \quad (13)$$

虚警率定义为:

$$P_f = \frac{DFP}{DTP + DFP} \quad (14)$$

对于两种典型尾流,比较 3 种方法在测试集上的识别率、虚警率,实验数据如表 2 所列。可以看出,3 种算法对于开尔文尾迹均具有较高的识别率;但对于湍流尾迹,由于尾流生成后的初始阶段主要表现为射流特征,随着时间的推移,尾流逐渐以自由湍流形式扩散,从而在图像中呈现为一条稍宽渐变区域(如图 7 第 2—4 行),其边缘特征弱、几何特性不明显,因此传统方法无法检测到这种尾流特征,而本文算法可得到准确的检测结果,检测率明显提高。从表 2 可以看出,相较于其他两种方法,本文算法具有较高的检测率,说明本文检测方法的适用性更广泛。同时,本文算法在虚警率上有一定优势,即对干扰有一定的抑制效果。通过对未能准确检测的案例进行分析发现,影响检测率的原因在于:1)增强后的尾流特征阈值分割参数的自适应性不强;2)较宽、较亮的尾流导致 Hough 变换域中峰值过高,淹没了其余尾迹。就虚警率而言,负样本中包含了海天经线场景,且海天经线有着和尾流类似的线性特征,梯度差异较大,这会造成尾流检测中的虚警。未来可以在尾流特征和海天经线特征之间的差异上做进一步研究,以降低虚警率。

表 2 本文算法与传统方法的定量比较

(单位:%)

	Canny 算子		Hough 变换		本文方法	
	PD	PF	PD	PF	PD	PF
Kelvin 尾流	61.60	20.60	72.90	18.20	90.10	11.40
湍流尾迹	0	—	0	—	74	11.90

**结束语** 本文研究了红外舰船尾流检测问题,提出了一

种基于 Gabor 滤波器组和局部信息熵特征融合的尾流检测算法,提高了检测率,解决了目标和背景对比度低时无法识别尾流特征的问题,对于具有一定宽度的湍流尾迹也能准确识别。未来可以将此方法应用到红外隐身条件下的舰船目标预测及跟踪,实现对舰船运动参数的估计。

## 参考文献

- [1] ZHANG X, LEWIS M, BISSETT W P, et al. Optical influence of ship wakes[J]. *Appl. Opt.*, 2004, 43(15): 3122-3132.
- [2] ZHANG J S, CUI H, ZHANG Y Q, et al. SWEI Processing and Compression Encoding Technology [J/OL]. *Journal of Xian Technological University*, paperuri: 18c1bf6d49bd87aee83156a3372f2548b.
- [3] 王慧丽, 齐昇, 刘焕英. 舰船尾流红外图像边界检测方法[J]. *红外与激光工程*, 2013, 42(2): 524-527.
- [4] 周晓明, 马秋禾, 肖蓉. 基于 Canny 算子的改进的图像边缘检测方法[J]. *影像技术*, 2008, 20(4): 17-20.
- [5] CHUTATAPE O, GUO L. A Modified Hough Transform for Line Detection and Its Performance [J]. *Pattern Recognition*, 1999, 32(2): 181-192.
- [6] COURMONTAGNE P. An improvement of ship wake detection based on the radon transform [J]. *Signal Processing*, 2005, 85(8): 1634-1654.
- [7] XU L, OJA E, KULTANEN P. A new curve detection method: Randomized Hough transform (RHT) [J]. *Pattern Recognition Letters*, 1990, 11(5): 331-338.
- [8] KARATHANASSI V, TOPOUZELIS K, SARANTOPOULOS D. Texture-based detection of sea wave direction[C]// *Proceedings of SPIE*. 2004.
- [9] 备与车辆工程, 2017(10): 96-97, 100. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/37.1433.TH.20171024.0703.044.html>.
- [5] SEBASTIANI F. Machine learning in automated text categorization [J]. *ACM Computing Surveys*, 2002, 31(2): 1-17.
- [6] 李航. 统计学习方法 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2012: 37-45.
- [7] 丁克良, 沈云中, 欧吉坤. 整体最小二乘法直线拟合[J]. *辽宁工程技术大学学报(自然科学版)*, 2010, 29(1): 44-47.
- [8] ALISON J, DUFFIELD S J, MORECROFT M D, et al. Successful restoration of moth abundance and species-richness in grassland created under agri-environment schemes [J]. *Biological Conservation*, 2017, 213: 51-58.
- [9] KIM J, HONG T, JEONG J, et al. An integrated psychological response score of the occupants based on their activities and the indoor environmental quality condition changes [J]. *Building and Environment*, 2017, 123: 66-77.
- [10] DECUYPER J, DE TROYER T, RUNACRES M C, et al. Non-linear state-space modelling of the kinematics of an oscillating circular cylinder in a fluid flow [J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2018, 98: 209-230.
- [11] LIN Z Y, ZHANG L X. Convergence to a self-normalized G-Brownian motion [J]. *Probability, Uncertainty and Quantitative Risk*, 2017, 2(1): 4.

(上接第 151 页)

**结束语** 本文提出一种电子竞技战术分析的 PNN 算法,解决了某些 MOBA 类电子竞技游戏无法通过接口获得准确数据从而难以进行数据分析的问题。算法用加权欧氏距离代替传统欧氏距离;同时向距离中加入常系数参数,利用最小二乘法取得常系数的最优解,增加了算法的灵活性以及数据的拟合性,同时用概率表示结果,更加清晰地展示电子竞技战术分析的结果。实验结果表明,本文算法对于电子竞技战术分析有较好的效果。但是在应用中需要根据实际战术需求增加或者减少核心点数量,需要将某个选手在赛场的结果进行联合分析以生成选手的行为模式模型,才能得到更加准确的战术分析效果。

## 参考文献

- [1] 何培奕. 中国电子竞技产业的现状和发展研究[D]. 上海: 上海外国语大学, 2013.
- [2] 张锐. 中国电子竞技进入最好的时代[N]. *证券时报*, 2017-10-10 (A03).
- [3] 任一彬. 中国电竞英雄联盟中国队 S5 季中赛制胜因素分析 [D]. 西北师范大学, 2016.
- [4] 田绍兴, 陈劲杰. 基于 KNN 的手写数字的识别[J/OL]. *农业装*