

文章编号 1004-924X(2019)04-0911-11

## 改进核相关滤波器的海上船只目标跟踪

董超<sup>1</sup>, 郑兵<sup>1\*</sup>, 李彬<sup>2</sup>, 田联房<sup>2</sup>, 刘蔚<sup>1</sup>

(1. 国家海洋局南海调查技术中心 国家海洋局南海维权技术与应用重点实验室, 广东 广州 510300;  
2. 华南理工大学, 广东 广州 510640)

**摘要:** 提高海上智能监测水平, 为了实现对海上船只目标的跟踪, 文中针对典型海况环境下的海上船只目标跟踪问题, 提出了一种改进核相关滤波器(Kernelized Correlation Filters, KCF)的船只目标跟踪算法。首先, 针对 KCF 算法的特征, 提出船只目标跟踪临界概率的概念, 用来判断目标跟踪是否异常; 接着, 加入卡尔曼滤波模块, 用来预测跟踪目标下一时刻的位置; 然后, 对跟踪异常的目标设计目标跟踪异常处理模块进行处理; 最后, 针对 4 组典型的海上目标跟踪场景, 通过实验验证了算法的性能。实验结果表明: 文中算法在海上船只大幅度晃动、跟踪目标被遮挡、目标出界、目标尺寸变换等复杂情况下, 跟踪准确率和速率比原 KCF 算法分别提高 17.23% 和 7.86%。满足海上目标跟踪精度、实时性、适用性等方面的要求。

**关键词:** 船只目标跟踪; 核相关滤波; 卡尔曼滤波; 跟踪异常; 复杂海况

**中图分类号:** TP391 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20192704.0911

## Shiptarget tracking with improved kernelized correlation filters

DONG Chao<sup>1</sup>, ZHENG Bing<sup>1\*</sup>, LI Bin<sup>2</sup>, TIAN Lian-fang<sup>2</sup>, LIU Wei<sup>1</sup>

(1. South China Sea Marine Survey and Technology Center, State Oceanic Administration, Key laboratory of Technology and Application for Safeguarding of Marine Rights and Interests, State Oceanic Administration, Guangzhou 510300, China;  
2. South China University of Technology, Guangzhou 510640, China)

\* Corresponding author, E-mail: 616765614@qq.com

**Abstract:** To achieve tracking of marine vessel targets and improve maritime intelligence monitoring levels, this study proposed a target tracking algorithm with improved kernelized correlation filters (KCF). First, per the characteristics of a KCF algorithm, the concept of ship target tracking critical probability was proposed for evaluating whether target tracking was abnormal. A Kalman filter module was added to the algorithm to predict the position of the tracking target at the next moment. A target tracking exception processing module was needed when tracking was abnormal, and an exception handling strategy was adopted. Finally, four sets of typical target tracking scenarios at sea were used to verify the performance of the algorithm through experiments. Under scenarios of large-scale shaking of the ship, tracking target occlusion, target out of bounds, and target size change, the

**收稿日期:** 2018-08-08; **修订日期:** 2018-10-05.

**基金项目:** 海洋公益性行业科研专项经费资助项目 (No. 201505002); 国家海洋局南海分局海洋科学技术局长基金资助项目 (No. 180214); 全球变化与海气相互作用专项资助

result shows the accuracy of our algorithm to be 17.23% higher than that of the original KCF algorithm, and the rate is increased by 7.86%. Thus, our algorithm meets the requirements of ship tracking accuracy, real-time performance, and applicability.

**Key words:** ship target tracking; kernelized correlation filters; kalman filtering; tracking anomaly; complex sea conditions

## 1 引言

近年来,视觉目标跟踪作为一个热门的研究方向,包括行人、车辆等在内的相关目标跟踪方面的研究也取得很大的进展。目标视觉跟踪依据目标外观模型表达方式不同是否使用背景信息等可以分为生成式方法<sup>[1]</sup>和判别式<sup>[2-3]</sup>方法两类,前者包括 Collins R T 等提出的 mean-shift 算法等,后者包括 Hare S 等提出的 Struck 以及 Kalal Z 等提出的 TLD (Tracking-Learning-Detection) 等在内的算法。目标跟踪的快速发展又产生了包括相关滤波<sup>[4-6]</sup>和深度学习<sup>[7-9]</sup>两类算法,2010 年, Bolme D S 等首次将相关滤波应用到目标跟踪上,使得目标跟踪的速率大幅度提升。Henriques J F 等在此基础上,先后提出 CSK 与 KCF 等算法,大幅改善了算法的准确性。在国内,王擘等提出一种自适应特征融合与模型更新的相关滤波算法<sup>[10]</sup>,针对 KCF 算法短期目标跟踪的问题,杨德东等提出一种长期目标跟踪的方法<sup>[11]</sup>,张雷等对 KCF(Kernelized Correlation Filters)算法中存在的尺度变化问题,提出一种自适应尺度目标跟踪算法<sup>[12]</sup>,推动了相关滤波算法的发展。

随着我国海洋事业的发展,人们对海洋智能监测的需求日益迫切。但鉴于海上跟踪环境的特殊复杂性,目前对海上船只目标跟踪的研究较少,且多集中在雷达、红外<sup>[13-14]</sup>等相关领域,在视觉跟踪<sup>[15-16]</sup>方面的研究更少。本文拟采用 KCF 算法对海上船只目标进行跟踪,在船只目标跟踪的过程中,不仅跟踪目标在运动,摄像头也会随船只摇晃,两者运动的叠加,造成了目标跟踪异常情景经常发生。如:(1)海况较差,摄像头快速、大幅度地摇晃而造成目标丢失;(2)跟踪的船只目标出界了,当目标再次回到场景中时,无法继续跟踪目标;(3)目标在跟踪的过程中被其它船只或障碍物遮挡,当目标离开遮挡物时,目标跟踪丢失;(4)目标由近及远或者由远及近运动时,目标尺度发生

改变,造成的目标丢失。在上述常见海上目标跟踪情形下,采用原 KCF 算法会经常导致目标跟踪失败。

为解决上述问题,本文提出一种改进 KCF 算法,主要改进有以下 3 点:(1)引入临界概率的概念,通过临界概率来判断目标是否跟踪异常,当目标跟踪异常时,停止训练模板等更新操作;(2)针对目标快速、大幅度晃动的问题,在算法中加入卡尔曼滤波的位置预测模块,对目标的下一时刻位置进行预测;(3)增加跟踪异常处理模块,对异常跟踪情况进行处理。通过上述改进,拟在复杂海况下完成对船只目标跟踪过程。

## 2 基于核相关滤波算法的船只目标跟踪

KCF 算法<sup>[6]</sup>采用岭回归函数作为分类器,通过样本循环构造大量的训练样本,来增强样本训练效果,通过对循环矩阵对角化处理,达到快速计算的目的。本节对 KCF 算法的改进是引入临界概率和目标生成概率的概念,根据两者之间的关系,来判断目标跟踪是否异常,在目标跟踪正常时,进行模板、尺度等更新。此外,本节对目标的尺度变化更新过程进行了改进,使跟踪框大小紧随目标尺寸变化。

### 2.1 循环矩阵构造

在 KCF 算法中,通过矩阵  $\mathbf{P}$ ,构造训练样本集  $\{P^u x | u=0, 1, \dots, n-1\}$ 。

$$\mathbf{P} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & \cdots & 1 \\ 1 & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & 1 & 0 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & 1 & 0 \end{bmatrix}. \quad (1)$$

对  $X_i = P^i x, \forall i=0, 1, \dots, n-1$  构造循环矩阵  $\mathbf{X} = C(x) = [X_0 \ X_1 \ \cdots \ X_{n-1}]^T$ 。

### 2.2 岭回归分类器

在 KCF 算法中采用岭回归分类器,通过样本

训练,寻找  $w$ ,使式(2)中函数  $f(z) = w^T \varphi(z)$  和目标值  $y$  间平方误差最小。

$$\min_w \sum_i (f(x_i) - y_i)^2 + \lambda \|w\|^2, \quad (2)$$

其中:  $x_i, y_i$  分别为样本和目标值,  $\lambda$  为正则化参数。

$w$  的最优解<sup>[17]</sup>如式(3):

$$w = \sum_i \partial_i \varphi(x_i), \quad (3)$$

则  $f(z)$  可以表示为式(4):

$$f(z) = w^T \varphi(z) = \sum_i \partial_i \varphi(x_i) \varphi(z_i) = \sum_i \partial_i k(x_i, z_i), \quad (4)$$

其中:  $k$  为高斯核函数,  $k(x_i, z_i)$  为核矩阵  $K$  的元素,由文献[6]可得式(4)的解,如式(5):

$$\partial = (K + \lambda I)^{-1} y. \quad (5)$$

对式(5)进行傅里叶变换,得到式(6):

$$\mathcal{F}(\partial) = \hat{\partial} = \frac{\mathcal{F}(y)}{\mathcal{F}(k^{xx} + \lambda)} = \frac{\hat{y}}{\hat{k}^{xx} + \lambda}, \quad (6)$$

其中  $k^{xx}$  表示核矩阵  $K$  中的第 1 行向量。

### 2.3 目标检测

对新输入图像的目标区域  $z$ ,通过循环移位构造样本集  $\{P^{i-1} z | i=1, 2, \dots, n\}$ ,与训练模板  $X$  进行相关计算得  $K_{i,j}^z = k(P^{i-1} z, P^{j-1} x)$ ,  $K^z$  为循环矩阵,其表达式如式(7)所示:

$$K^z = C(k^{xz}), \quad (7)$$

其中  $k^{xz}$  为  $x$  和  $z$  的核相关,且  $k^{xz}$  是循环矩阵  $K^z$  的第 1 行元素。

由式(7)得分类器响应概率分布  $f(z)$  如式(8):

$$f(z) = (K^z)^T \partial, \quad (8)$$

其中  $f(z)$  中的元素值表示区域  $z$  中对应位置为目标的概率,实验中取概率最大值作为目标位置。

### 2.4 目标跟踪与临界概率

在式(8)中,若仅取  $f(z)$  中概率最大值  $P_{\max}$  点对应的位置为目标,当发生船只目标丢失等异常行为时,在该位置点依然进行模板尺度更新等操作,显然是错误的。当目标跟踪出现异常,应当及时发现,并阻止进行模板尺度更新等操作。

为此本文中设置:(1)目标跟踪的临界概率  $P_0$ ; (2)  $f(z)$  中最大值为目标生成概率  $P$ 。只有  $P \geq P_0$  时,目标处于正常跟踪状态;如果  $P < P_0$ ,表示目标跟踪出现异常,需要进入目标跟踪异常处理程序,直至恢复正常跟踪状态。

本文中,  $P_0$  的取值极为重要,  $P_0$  值也是判断目标是否正常跟踪的最重要的指标。实验中在将  $f(z)$  中目标概率分布归一化之后,当  $P_0 = 0.40$  时,对船只目标有良好的跟踪效果。

### 2.5 目标训练模板更新与尺度变换

由于船只目标运动状态的变化,保持模板更新和合适的尺度变化能提高跟踪精度。结合 2.4 节中,  $P \geq P_0$  的目标正常跟踪状态时,才进行模板更新和尺度变换。目标模板更新如式(9)所示:

$$\partial = (1 - \beta) \partial' + \beta \partial, \quad (P \geq P_0, 0 < \beta < 1), \quad (9)$$

其中:  $\partial'$  和  $\partial$  分别通过对前一帧和当前帧图像训练得到,  $\beta$  为更新系数。

尺度变换主要在船只目标尺度变化后,调整跟踪框的尺寸。尺度变换方法如式(10)所示:

$$\begin{cases} P: (cx, cy, w, h) \\ P_S: (cx, cy, \gamma w, \gamma h) \\ P_L: \left\{ cx, cy, \frac{1}{\gamma} w, \frac{1}{\gamma} h \right\} (P \geq P_0, 0 < \gamma < 1), \\ P = \max(P, P_L, P_S) \end{cases} \quad (10)$$

其中:  $(cx, cy)$  为跟踪框的中心坐标,  $w, h$  分别为跟踪框的宽和高,  $\gamma$  为尺度变换系数。仅当  $P \geq P_0$  时,进行尺寸变换。  $P, P_S, P_L$  分别表示在保持跟踪框的中心位置不变的时,将跟踪框的宽和高分别保持不变、缩小  $\gamma$  和放大  $\frac{1}{\gamma}$  时得到的目标生成概率。取 3 者的最大值作为最后结果,并置跟踪框的高和宽为对应值。

## 3 基于卡尔曼滤波的船只目标位置预测

卡尔曼滤波<sup>[18]</sup>是一种对线性系统进行最优估计的算法。本节将在 KCF 算法中加入基于卡尔曼滤波的位置预测模块。在目标的跟踪过程中,结合卡尔曼滤波的方法预测船只目标的位置,不仅极大地提高了船只目标位置跟踪的准确性,而且加快了目标跟踪速度。

在船只目标的跟踪过程中,其  $X$  轴方向运动可近似为匀速直线运动。 $Y$  轴方向的近余弦运动可划分  $N$  段,相邻的波峰和波谷之间为一段,每一小段近似为匀速直线运动,相邻两段运动方向相反。

通过卡尔曼滤波对船只目标跟踪过程中的状态预测步骤如下。

(1) 利用状态模型, 预测船只目标下一时刻运动状态如式(11):

$$\begin{cases} \mathbf{X}(k|k-1) = \mathbf{A}\mathbf{X}(k-1|k-1) \\ \mathbf{P}(k|k-1) = \mathbf{A}\mathbf{P}(k-1|k-1)\mathbf{A}' + \mathbf{Q} \end{cases}, \quad (11)$$

其中:  $\mathbf{X}(k|k-1)$  为状态预测结果,  $\mathbf{X}(k-1|k-1)$  为最优状态估计, 选择状态变量  $\mathbf{X} = [S_x, S_y, V_x, V_y]$ ,  $(S_x, S_y)$  为船只目标位置点坐标,  $V_x, V_y$  分别为 X, Y 方向的速度大小,  $\mathbf{P}(k|k-1)$  为协方差估计,  $\mathbf{P}(k-1|k-1)$  为最优协方差估计,  $\mathbf{A}$  为状态转移矩阵,  $\mathbf{Q}$  系统过程噪声。

(2) 利用观测模型, 对船只目标的系统状态进行更新如式(12):

$$\begin{cases} \mathbf{X}(k|k) = \mathbf{X}(k|k-1) + \mathbf{K}(k)(\mathbf{Z}(k) - \mathbf{H}\mathbf{X}(k|k-1)) \\ \mathbf{K}(k) = \mathbf{P}(k|k-1)\mathbf{H}' / (\mathbf{H}\mathbf{P}(k|k-1)\mathbf{H}' + \mathbf{R}) \\ \mathbf{P}(k|k) = (\mathbf{I} - \mathbf{K}(k)\mathbf{H})\mathbf{P}(k|k-1) \end{cases}, \quad (12)$$

其中:  $\mathbf{K}(k)$  为卡尔曼增益,  $\mathbf{Z}(k)$  为船只目标测量结果,  $\mathbf{Z} = [S_x, S_y]$ ,  $\mathbf{H}$  为测量矩阵,  $\mathbf{R}$  为测量噪声。

在本文中, 测量结果  $\mathbf{Z}(k)$  具备很高的置信度, 因此测量噪声  $\mathbf{R}$  取值很小,  $\mathbf{R} = 10^{-6} \mathbf{I}_2$ ,  $\mathbf{I}_2$  为  $2 \times 2$  单位矩阵。过程噪声  $\mathbf{Q}$  取值比较大,  $\mathbf{Q} = 10^{-1} \mathbf{I}_4$ ,  $\mathbf{I}_4$  为  $4 \times 4$  单位矩阵。其它参数取值如式(13)所示:

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{H} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}. \quad (13)$$

通过卡尔曼滤波预测跟踪目标下一时刻的位置, 以预测位置为中心进行目标搜索, 得到最终测量结果。实验表明, 该方法有效地提高了目标跟踪的效率。

#### 4 船只目标跟踪异常与目标搜索策略

本节在 KCF 算法中加入异常处理模块, 在目标跟踪异常时, 进入异常处理过程。目标跟踪异常又分为目标出界和目标未出界两种情况, 判断目标跟踪出现异常的方法是  $P < P_0$ , 具体如下。

##### 4.1 目标未出界的跟踪异常

主要情景是由于船只晃动或者船只目标被遮

挡而造成目标丢失。在此种情况下, 丢失的目标主要在跟踪框的附近, 在文中采取扩大搜索范围的方法, 重新搜索跟踪目标, 直到目标的生成概率大于  $P_0$ , 满足目标跟踪的临界条件。具体搜索策略如图 1 所示(彩图见期刊电子版)。

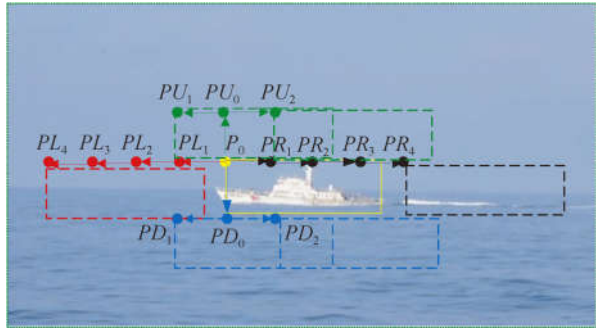


图 1 扩大目标搜索范围  
Fig. 1 Expand target search range

在图 1 中, 黄色框为目标的跟踪框, 左上角的坐标点为  $P_0$  (黄色点), 框内即为目标船只。设置步长  $h = k_0 \times \omega$ ,  $\omega$  为跟踪框的宽度,  $0 < k_0 < 1$ 。如果目标跟踪异常, 采取搜索策略如下:

步骤 1: 将  $P_0$  沿水平方向, 每次向左移动  $h$ , 分别到达点  $PL_1, PL_2, PL_3, PL_4$  (图 1 红色点) 处, 计算目标生成概率  $P$ , 如果  $P \geq P_0$ , 则将对应位置点设为跟踪框起始点, 退出搜索。否则, 转步骤 2;

步骤 2: 同理, 依次将  $P_0$  水平向右移动  $h$  到达点  $PR_1, PR_2, PR_3, PR_4$  (图 2 中黑色点) 处, 计算  $P$  值, 如果  $P \geq P_0$ , 将对应位置点设为跟踪框起始点, 退出搜索。否则, 转步骤 3;

步骤 3: 同理, 将  $P_0$  分别向上和向下移动  $h$  到达点  $PU_0, PU_1, PU_2, PD_0, PD_1, PD_2$  计算  $P$  值, 如果  $P \geq P_0$ , 则将对应点位置设为跟踪框起始点, 退出搜索, 直到找到目标位置。

针对目标未出界且跟踪异常的情形, 由于目标在跟踪框的附近, 采取以跟踪框为中心, 扩大目标搜索的范围的方式。实验表明, 该策略在目标丢失、目标被遮挡等情况下具有很好的实时跟踪效果。

##### 4.2 目标出界的跟踪异常

对于目标出界, 跟踪目标丢失, 当目标再次进入视场, 无法跟踪的情形。文中采取一种全局搜索和局部搜索相结合的方法来重新跟踪进入视场

的目标。具体为:(1)全局搜索是一种粗搜索的方式,通过全局搜索锁定进入视场目标的大致位置;(2)局部搜索是一种精准搜索方式,对(1)已经得到目标的大致位置附近进行局部精准搜索,最后找到目标的位置。

对于目标出界的情况,可以分为从图像的上或者下边界出界与从图像的左或者右边界出界两种情况。目标从下边界出界情况如图 2(彩图见期刊电子版)。

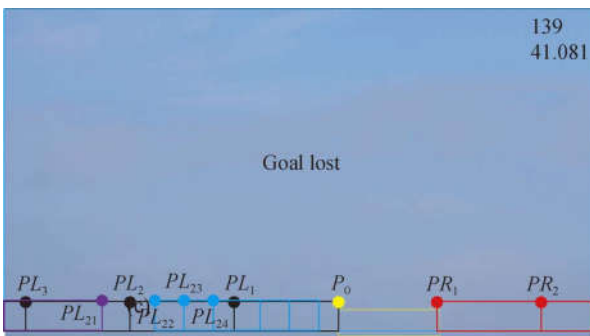


图 2 目标出界搜索

Fig. 2 Search target out of bounds

全局搜索:图 2 是在目标跟踪过程中,目标从下边界出界的情况。黄色框为目标跟踪框,  $P_0$  (黄色点)为该框起始点,由于目标从下边界的某点出界,目标也必然从下边界进入视场。该处全局搜索是指对图像下边界进行全覆盖搜索,设置搜索步长为  $h_1 = \omega$ ,  $\omega$  为跟踪框的宽度,设置搜索临界概率  $P'_0 = k_1 P_0$ ,  $0 < k_1 < 1$ ,具体步骤如下:

步骤 1:以  $P_0$  为起点,将跟踪框水平向左移动步长  $h_1$ ,到达  $PL_1$  处,计算目标生成概率  $P$ ,如果  $P \geq P'_0$ ,将  $PL_1$  处黑色点设为跟踪框起始点,退出全局搜索,进入局部搜索。否则转步骤 2;

步骤 2:以  $P_0$  为起点,将跟踪框水平向右移动步长  $h_1$ ,到达  $PR_1$  处,计算目标生成概率  $P$ ,如果  $P \geq P'_0$ ,将  $PR_1$  处红色点设为跟踪框起始点,退出全局搜索,进入局部搜索。否则转步骤 3;

步骤 3:以此类推,以  $P_0$  位置为中心点,采用左右两边交替的方式,依次对点  $PL_1, PR_1, PL_2, PR_2 \dots$  进行搜索,如果有满足  $P \geq P'_0$ ,则退出全局搜索,进步局部搜索。如果均不满足  $P \geq P'_0$  的条件,则可判断目标并未进入视场,最后将  $P$  值最大的位置设为下一帧图像跟踪框的初始位置,进行迭代。

局部搜索:假如通过全局搜索找到满足条件的位置点  $PL_2$ ,如图 3 所示。则以  $PL_2$  为中心点,对  $PL_2$  点左边和右边范围  $PL_{21}, PL_{22}, PL_{23}, PL_{24}$  进行局部搜索,局部搜索方法和上述目标未出界的方法类似,分别依次向左和向右移动,移动的单位步长为  $h = k_0 \omega$ ,计算目标的生成概率  $P$ ,如果  $P \geq P_0$ ,则表示已经跟踪上目标,退出局部搜索,进入正常跟踪过程。否则将  $P$  值最大的位置设为下一帧图像跟踪框的初始位置,进行迭代。

对于目标出界跟踪异常,目标下次进入视场的位置是不确定的,通过全局搜索找到目标进入视场的大致点位,然后通过在该点位进行局部搜索,精准的锁定目标的位置,实现对跟踪异常目标的重新跟踪。

对目标从左边界或者右边界出界,采用类似的方法。实验表明,该方法对出界的目标具有很好的适应性,可以实现对从各方向出界目标的重新跟踪。异常处理流程如图 3 所示。

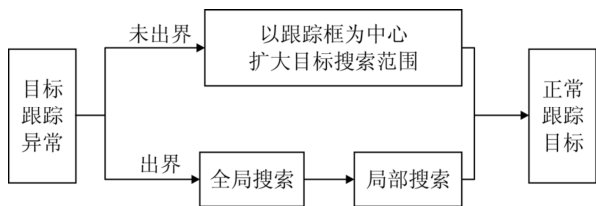


图 3 目标跟踪异常处理流程图

Fig. 3 Flow chart of target tracking exception processing

### 4.3 海上船只目标跟踪流程

综上所述,本文中整个海上船只目标跟踪过程的流程如图 4 所示。

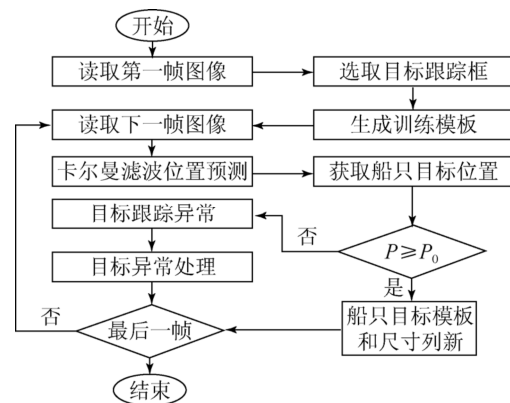


图 4 船只目标跟踪流程图

Fig. 4 Flow chart of ship target tracking

## 5 实验结果分析

### 5.1 实验环境与参数

文中实验在 CPU Intel Core i5-3230, 主频 2.6 GHz, 4 GB 配置, VS2013 的环境中进行。为了验证改进后 KCF 算法的实际跟踪效果, 在本文试验中选取 4 组典型的海上船只目标跟踪的视频, 视频为 AVI 格式, 分辨率为  $960 \times 540$  pixel, 帧速率为 23.8 f/s。视频的其它特征如表 1 所示。

表 1 实验中视频的特征

Tab. 1 Video features in experiments

序号	视频特征
视频 1	单目标; 目标快速、大幅度上下摇晃; 目标从上下边界出视野
视频 2	多目标; 目标被遮挡, 甚至完全遮挡
视频 3	多目标; 目标从右边界出界; 水平方向快速移位
视频 4	单目标; 目标尺寸变化

### 5.2 实验过程与分析

实验中, 截取目标跟踪过程中的典型画面如图 5~图 8 所示。图中右上角第 1 行数字表示当前图像的帧数, 第 2 行数字表示当前跟踪速率。中心的 goal lost 表示当前  $P < P_0$ , 目标跟踪异常, 没有该字样表示  $P \geq P_0$ , 目标处在正常跟踪过程。

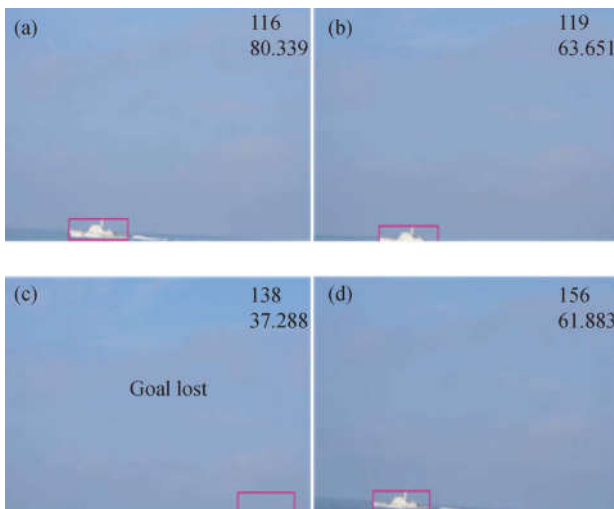


图 5 视频 1 目标向下出界  
Fig. 5 Out of bounds target in Video 1

图 5 表示视频 1 中的目标从下边界出界的过程, 其中图 5(a)~5(d) 分别表示目标即将出界、目标正在出界、目标已经出界、目标重新进入视野被跟踪的过程, 该过程伴随着目标快速、大幅度上下晃动。

图 6 表示目标被遮挡的过程, 其中图 6(a)~6(d) 分别表示目标即将被遮挡、目标被完全遮挡、目标部分被遮挡、目标被重新跟踪的过程。

图 7 表示目标从右边界出界的过程, 类似于图 6 的过程。

图 8 表示目标向远处运动的过程, 从图 8(a)~8(d) 可以看出随着船只目标的可见尺寸在变小, 跟踪框也相应的变小, 并且紧紧的跟随目标尺寸变化。

文中临界概率的取值  $P_0$  为经验取值, 在实验过程中选取的典型视频截图 5~图 8 中, 每个图的子图对应的目标生成概率值  $P$  如表 2 所示。

表 2 船只目标生成概率

Tab. 2 Generation probability of ship target

生成概率	第 2 帧	(a)	(b)	(c)	(d)
图 5 视频 1	0.80	0.75	0.55	0.15	0.46
图 6 视频 2	0.83	0.70	0.31	0.30	0.42
图 7 视频 3	0.75	0.67	0.39	0.24	0.48
图 8 视频 4	0.71	0.77	0.76	0.61	0.77

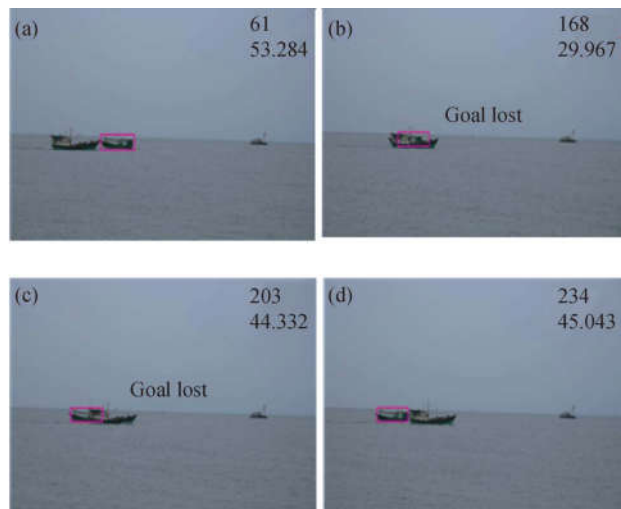


图 6 视频 2 目标被遮  
Fig. 6 Occluded target in Video 2

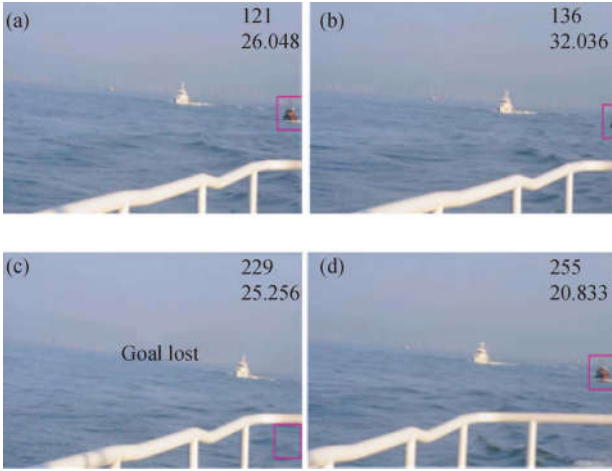


图 7 视频 3 目标向左出界  
Fig. 7 Out of bounds target in Video 3

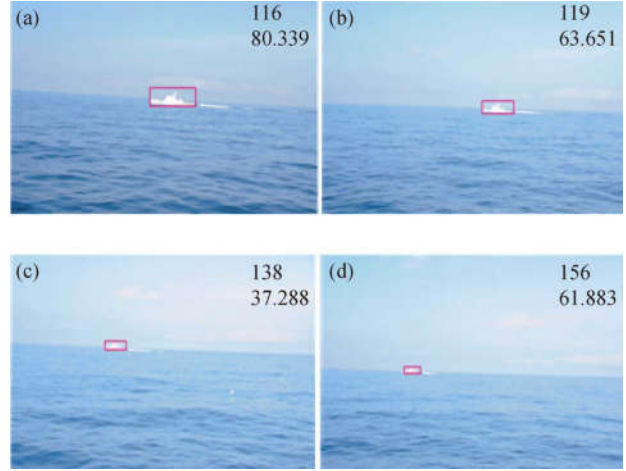


图 8 视频 4 目标尺寸变化  
Fig. 8 Changing target size in Video 4

表 2 中第 2 列中“第 2 帧”表示通过手动选择船只目标跟踪框的目标生成概率  $P$  的起始值,此时的  $P$  取值较大,表示刚开始目标跟踪的精度较高,而在图 5(c)中, $P$  值为 0.15,表示目标完全出界。根据这些不连续状态的分析结果便可初步的确定  $P_0$  值大小,比如图 5(c)、图 6(b)、图 6(c)、图 7(b)、图 7(c)表示目标部分出界、完全出界、部分被遮挡或完全遮挡的情况下,临界概率  $P_0$  就应该大于此处的  $P$  值。在目标处于正常跟踪情况下,临界概率  $P_0$  可以适当的取得比该处的  $P$  值略小。

在实际选取临界概率  $P_0$  需要结合目标跟踪精度、目标跟踪的实时性和目标跟踪的广泛适用性等方面的要求,来对临界概率进行合理的取值。本文通过大量实验对海上船只目标跟踪的连续状态进行分析,最终取  $P_0=0.40$ 。

为了定量的分析本文的算法在船只目标跟踪方面的性能,实验中选取了目标生成概率  $P$  (Target Generation Probability)、目标跟踪速率 (Target Tracking Rate)、中心位置误差 (Center Location Error, CLE)、重叠率 (Overlap Score, OS) 作为评价标准。中心位置误差和重叠率的计算如式 (14) 和式 (15) 所示:

$$CLE = \sqrt{(x_i - x_{i_{gt}})^2 + (y_i - y_{i_{gt}})^2}, \quad (14)$$

其中:  $(x_i, y_i)$  为实验中获得第  $i$  帧图像目标中心位置,  $(x_{i_{gt}}, y_{i_{gt}})$  为通过手工标记第  $i$  帧图像目标中心位置。

$$OS = \frac{area(R_{ti} \cap R_{gti})}{area(R_{ti} \cup R_{gti})}, \quad (15)$$

其中  $R_{ti}, R_{gti}$  分别为实验获得第  $i$  帧图像的跟踪框

窗口和手工标记第  $i$  帧图像的跟踪框窗口。

实验中将本文算法和原 KCF、TLD 算法在相同的实验条件下进行对比,得到的实验结果如下。

### 5.2.1 目标生成概率

由于算法原理的不同,TLD 算法不具备计算该值的条件,将本文算法和原 KCF 算法进行对比,对比试验结果如图 9 和表 3 所示。

表 3 平均目标生成概率

Tab. 3 Average target generation probability

生成概率	原 KCF 算法	改进 KCF 算法	准确率提高/%
视频 1	0.42	0.61	45.23
视频 2	0.59	0.57	-3.38
视频 3	0.44	0.50	13.63
视频 4	0.67	0.76	13.43

### 5.2.2 目标跟踪速率

在相同条件下,实际测得的不同算法的船只目标跟踪速率如图 10 和表 4 所示。

表 4 目标平均跟踪速率

Tab. 4 Average target tracking rate ( $f \cdot s^{-1}$ )

目标跟踪速率	跟踪速率			速率提高/%
	TLD 算法	原 KCF 算法	改进 KCF 算法	
视频 1	9.50	127.30	144.81	13.75
视频 2	8.72	113.67	117.85	3.67
视频 3	0.58	47.43	51.39	8.34
视频 4	4.06	135.46	143.15	5.67

其中表 4 中速率提高是指本文算法相对原 KCF 算法跟踪速率提高的百分比。

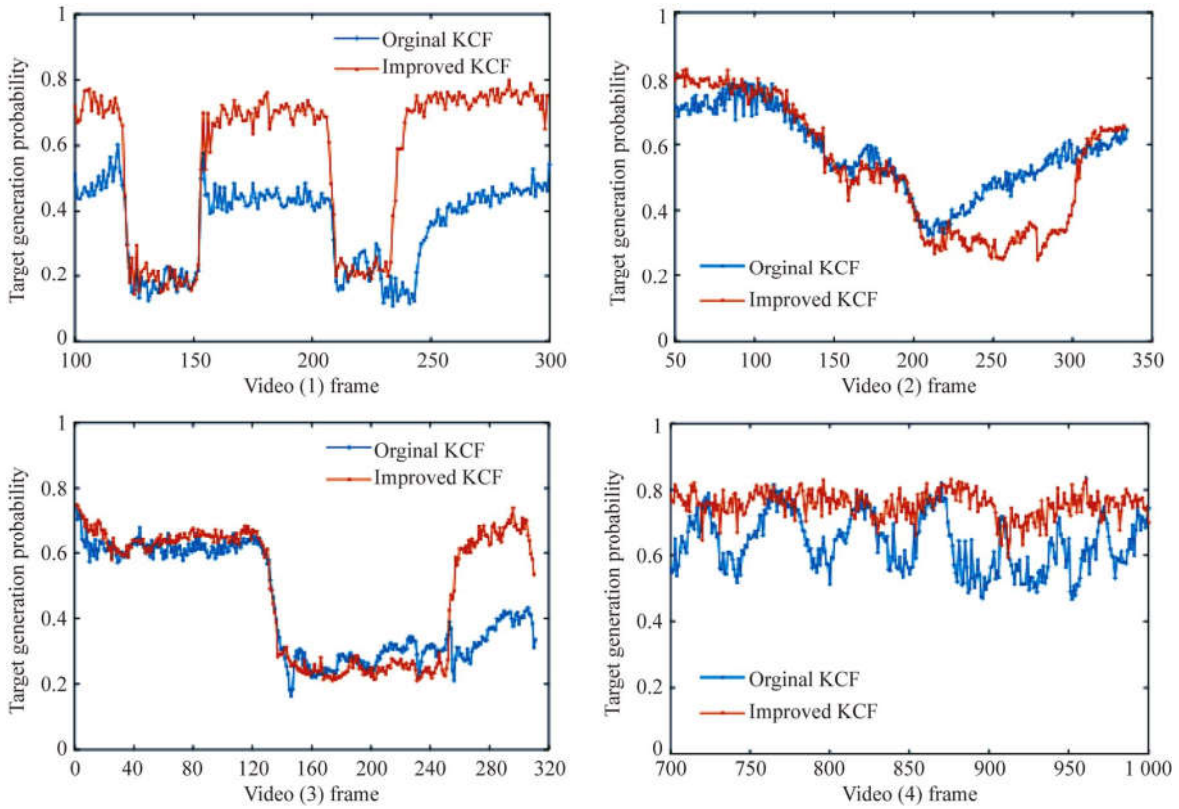


图 9 船只目标生成概率  
Fig. 9 Generation probability of ship target

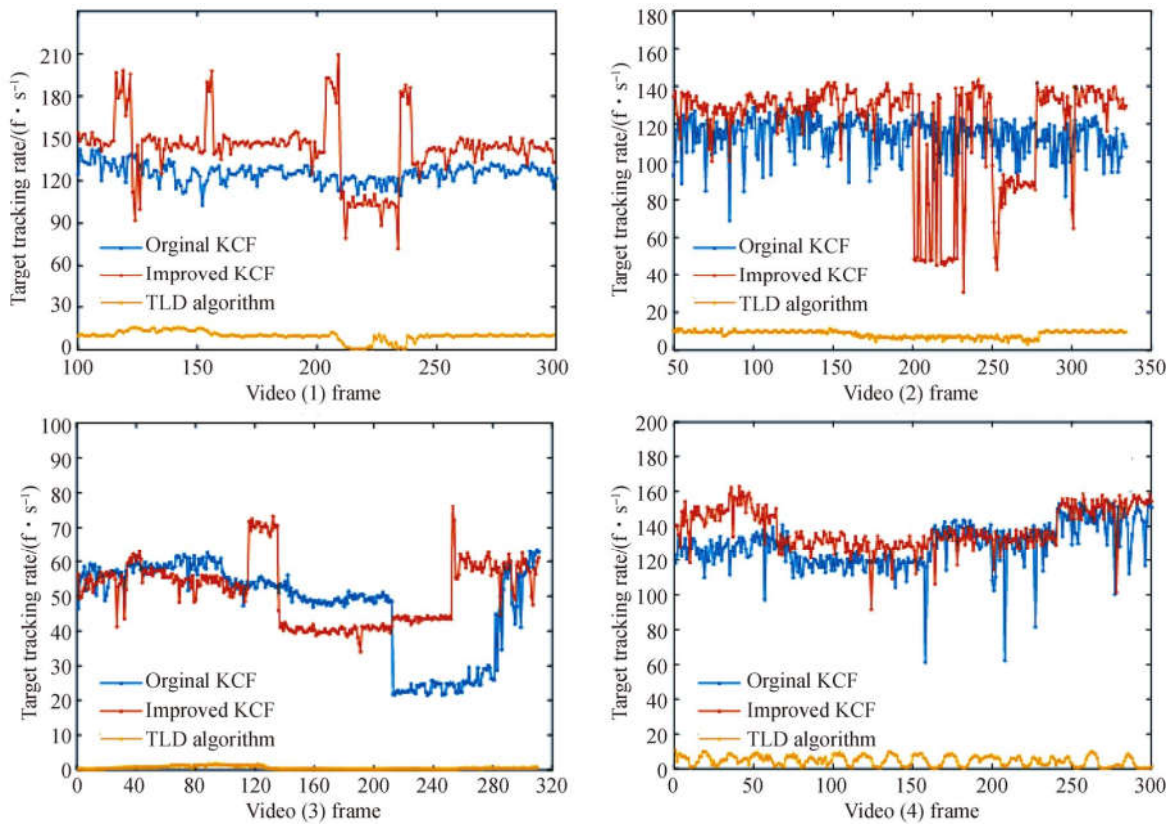


图 10 目标跟踪速率  
Fig. 10 Tracking rate of target

### 5.2.3 中心位置误差

中心位置误差(Center Location Error, CLE)是指实验跟踪框中心点与标记跟踪框中心点之间的距离。在试验中,不同算法得到的平均中心位置误差如表5所示。

表5 平均中心位置误差  
Tab. 5 Average center location error (pixel)

CLE 中心位置误差	TLD 算法	原 KCF 算法	改进 KCF 算法
视频 1	4.45	5.46	3.42
视频 2	19.33	48.44	9.81
视频 3	9.29	58.97	5.40
视频 4	5.88	3.01	2.76

### 5.2.4 重叠率

重叠率(Overlap Score, OS)是指实验跟踪框与标记跟踪框的公共面积和总面积的比值,重叠率越高,说明目标跟踪精度越高。实验中,对不同算法最后得到船只跟踪目标的平均重叠率如表6所示。

表6 平均重叠率  
Tab. 6 Average overlap score (%)

OS 重叠率	TLD 算法	原 KCF 算法	改进 KCF 算法
视频 1	0.89	0.79	0.84
视频 2	0.62	0.57	0.74
视频 3	0.56	0.49	0.74
视频 4	0.67	0.70	0.72

对于视频1和视频3,图9(A)中,在第140帧和220帧附近,目标生成概率很低,分别表示当前跟踪目标向下和向上出界,其中向下出界对应图(5)所示情形。图9(C)中,在第150~240 f/s范围内,目标的生成概率同样很低,表示当前跟踪目标向右出界,对应图(7)中情形。本文算法和TLD算法均可在目标出界后并再次进入视野中进行正确地跟踪,原KCF算法在视频1中经常性跟丢目标,在视频3中直接跟丢目标。表5视频3的平均中心位置误差,原KCF算法的值远大于本文算法和TLD算法,表6视频3中的原KCF算法平均重叠率也偏小。在视频1和视频3中,本文算法跟踪精度较高,实时性较好,原KCF算法存在目标跟丢状况,TLD算法实时性较差,跟踪精度也不如本文算法。

对于视频2,图9(b)中,在第200~300 f/s的范围内,本文算法的目标生成概率低于原KCF算法,主要是由于跟踪目标进入完全被遮挡的状态,原KCF算法和TLD算法都跟丢了目标。在图10(b)中200~300 f/s范围内,本文算法的跟踪速率低于原KCF算法,是由于本文算法在目标被遮挡后,启动目标异常处理过程,进行更大范围的搜索导致。在表5视频2中,原KCF和TLD算法的中心位置误差也远大于本文算法。在表6视频2中,原KCF算法和TLD算法的平均重叠率相应偏低。在目标在被遮挡的过程中,只有本文算法实现对遮挡目标的正确跟踪,并且跟踪精度高,实时性较好,TLD和原KCF算法都跟丢目标,且随跟踪时间延长,本文算法优势越明显。

对于视频4,目标由近及远,尺寸发生变化,本文算法能够随尺寸变化自动调整跟踪框大小,对目标进行准确跟踪。在实验中,TLD算法的跟踪速率受图像尺寸的影响,当图像尺寸减小时,可以提高TLD算法的速率,而本文算法和原KCF算法几乎不受图像尺寸影响。

综合上述实验结果,可以发现本文算法对海上船只目标跟踪的准确率和速率都得到大幅度的提升,在针对船只跟踪目标在海上大幅度晃动、目标出界、目标被遮挡、目标尺寸变化等情形下,均能实现对海上目标的准确跟踪。

## 6 结论

文中针对海上视觉目标跟踪的问题,在典型复杂的海况条件下,对海上目标跟踪进行了研究,提出了一种改进核相关滤波器的海上船只目标跟踪算法。通过引入了临界概率的概念,判断目标是否跟踪异常;加入卡尔曼滤波模块,降低目标跟踪异常的概率;当目标跟踪异常时,启动目标跟踪异常处理程序。为了验证算法的性能。实验中选取了4组典型的海上跟踪视频,结果表明,本文算法的平均中心误差为5.35 pixel,平均重叠率为0.76,优于TLD和原KCF算法。与原KCF算法相比,本文算法的目标跟踪准确率提高17.23%,目标跟踪的速率提高7.86%。可以实现对船只目标在海面上大幅快速晃动、目标被遮挡、目标出界、尺寸变换等典型复杂海况环境下的准确跟踪,在实际应用中具有更广泛的适用性。

## 参考文献:

- [1] COLLINS R T. Mean-shift blob tracking through scale space [C]. *Computer Vision and Pattern Recognition*, 2003. *Proceedings. 2003 IEEE Computer Society Conference on. IEEE*, 2003;234.
- [2] HARE S, SAFFARI A, TORR P H S. Struck: Structured output tracking with kernels [C]. *International Conference on Computer Vision. IEEE Computer Society*, 2011;263-270.
- [3] KALAL Z, MIKOLAJCZYK K, MATAS J. Tracking-learning-detection [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis & Machine Intelligence*, 2012, 34(7):1409-1422.
- [4] BOLME D S, BEVERIDGE J R, DRAPER B A, *et al.*. Visual object tracking using adaptive correlation filters[C]. *Computer Vision and Pattern Recognition. IEEE*, 2010;2544-2550.
- [5] HENRIQUES J F, CASEIRO R, *et al.*. *Exploiting the Circulant Structure of Tracking-by-Detection with Kernels* [M]. Berlin; Computer Vision-ECCV 2012. Springer Berlin Heidelberg, 2012; 702-715.
- [6] HENRIQUES J F, CASEIRO R, MARTINS P, *et al.*. High-speed tracking with kernelized correlation filters [J]. *IEEE Transaction on pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2015, 37(3):583-596.
- [7] WANG N, YEUNG D Y. Learning a deep compact image representation for visual tracking[C]. *International Conference on Neural Information Processing Systems. Curran Associates Inc*, 2013;809-817.
- [8] NAM H, HAN B. Learning multi-domain convolutional neural networks for visual tracking[C]. *Computer Vision and Pattern Recognition. IEEE*, 2016;4293-4302.
- [9] CUI Z, XIAO S, FENG J, *et al.*. Recurrently target-attending tracking [C]. *IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. IEEE Computer Society*, 2016;1449-1458.
- [10] 王暉, 王春平, 李军, 等. 特征融合和模型自适应更新相结合的相关滤波目标跟踪 [J]. *光学精密工程*, 2016, 24(8):2059-2066.
- WANG W, WANG CH P, LI J, *et al.*. Correlation filter tracking based on feature fusing and model adaptive updating [J] *Opt. Precision Eng.*, 2016, 24(8):2059-2066. (in Chinese)
- [11] 杨德东, 蔡玉柱, 毛宁, 等. 采用核相关滤波器的长期目标跟踪 [J]. *光学精密工程*, 2016, 24(8): 2037-2049.
- YANG D D, CAI Y ZH, MAO N, *et al.*. Long-term object tracking base on kernelized correlation filters [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2016, 24(8): 2037-2049. (in Chinese)
- [12] 张雷, 王延杰, 孙宏海, 等. 采用核相关滤波器的自适应尺度目标跟踪 [J]. *光学精密工程*, 2016, 24(2):448-459.
- ZHANG L, WANG Y J, SUN H H, *et al.*. Adaptive scale object tracking with kernelized correlation filters [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2016, 24(2):448-459. (in Chinese)
- [13] 赵菲, 卢焕章, 张志勇. 基于改进多特征融合均值位移算法的红外舰船目标跟踪 [J]. *系统工程与电子技术*, 2014, 36(2):205-213.
- ZHAO F, LU H ZH, ZHANG ZH Y. Infrared ship tracking based on improved multi-features fusion based mean-shift [J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2014, 36(2):205-213. (in Chinese)
- [14] 王悦行, 陈晓冬, 赵克军, 等. 海天背景下红外舰船目标实时跟踪算法研究 [J]. *弹箭与制导学报*, 2016, 36(1):165-170.
- WANG Y X, CHEN X D, ZHAO K J, *et al.*. Infrared ship target real-time tracking algorithm under sea-sky background [J]. *Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance*, 2016, 36(1):165-170. (in Chinese)
- [15] 张树怀, 董超, 李彬, 等. 多目标舰船自动跟踪方法研究 [J]. *中国海洋大学学报:自然科学版*, 2017, 47(2):128-136.
- ZHANG SH H, DONG CH, LI B, *et al.*. The automatic tracking method for multi-ship tracking based on TLD [J]. *Periodical of Ocean University of China*, 2017, 47(2):128-136. (in Chinese)
- [16] 邢艾华, 崔智高, 等. 改进核相关滤波的运动目标跟踪算法 [J]. *红外与激光工程*, 2016, 45(b05): 214-221.
- XING A H, CUI ZH G, *et al.*. Moving target tracking algorithm based on improved Kernelized correlation filter [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45(b05):214-221. (in Chinese)
- [17] RIFKIN R, YEO G, POGGIO T. Regularized least-squares classification [J]. *Acta Electronica Sinica*, 2003, 190(1):93-104.
- [18] 石龙伟, 邓欣, 王进, 等. 基于光流法和卡尔曼滤波的多目标跟踪 [J]. *计算机应用*, 2017, 37(a1):

131-136.

SHI L W, DENG X, WANG J, *et al.*. Multiple object tracking based on optical flow and kalman

filtering [J]. *Journal of Computer Application*, 2017, 37(a1):131-136. (in Chinese)

#### 作者简介:



**董超**(1982—)男,新疆哈密人,博士,副研究员,2010年于北京航空航天大学获得博士学位,2012年于华南理工大学博士后出站,主要从事无人艇研制与应用,图像处理等方面的研究。E-mail: dongchaoxj888@126.com

#### 导师简介:



**田联房**(1968—),男,山东济宁人,教授,博士生导师,1994年于山东工业大学获得硕士学位,1997年于哈尔滨工业大学获得博士学位,主要从事机器人、医学影像处理、智能控制系统等方面的研究。E-mail: c\_hlftian@scut.edu.cn

#### 通讯作者:



**郑兵**(1990—),男,湖北黄冈人,硕士,工程师,2014年于哈尔滨工程大学获得学士学位,2017年于华南理工大学获得硕士学位,主要从事计算机视觉、图像处理等方面的研究。E-mail: 616765614@qq.com