

# 基于UKF的水面垃圾清理无人船定位

谢开鑫<sup>1</sup>, 肖怀前<sup>2</sup>, 袁 聪<sup>2</sup>, 王晨煜<sup>4</sup>, 王成军<sup>1</sup>, 张 霖<sup>1,3</sup>

(1. 安徽理工大学 人工智能学院, 安徽 淮南 232001; 2. 江苏省淮沭新河管理处, 江苏 淮安 223005;  
3. 长江师范学院 机器人工程学院, 重庆 408100; 4. 中国石油天然气股份有限公司西南油气田分公司, 重庆 408100)

**摘要:** 针对无人船在水面垃圾清理时的问题, 重点调研了无人船的动态定位与追踪技术, 提出了基于无先导UKF的无人船定位方法, 并通过仿真与实验论证了本方法的有效性。

**关键词:** 无人船艇; 智能控制; 无人控制; 卡尔曼滤波

中图分类号: TV213.4

文献标识码: B

文章编号: 1007-7839(2023)05-0043-0005

## UKF-based positioning of unmanned ship for water surface waste removal

XIE Kaixin<sup>1</sup>, XIAO Huaqian<sup>2</sup>, YUAN Cong<sup>2</sup>, WANG Chenyu<sup>4</sup>,  
WANG Chengjun<sup>1</sup>, ZHANG Lin<sup>1,3</sup>

(1. School of Artificial Intelligence, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, China;  
2. Jiangsu Huaishu Xin River Management Office, Huai'an 223005, China;  
3. School of Robotics Engineering, Changjiang Normal University, Chongqing 408100, China;  
4. Petro China Southwest Oil and Gasfield Company, Chongqing 408100, China)

**Abstract:** Aiming at the problems of unmanned ships cleaning up garbage on the water surface, the kinematic positioning and tracking technology of unmanned ships are emphatically investigated. A pilotless UKF based unmanned ship positioning method is proposed, and its effectiveness is demonstrated by simulation and experiments.

**Key words:** unmanned ship; intelligent control; unmanned control; Kalman Filter

## 1 概 述

无人船艇(unmanned surface vessels, USVs)也被称为自主水面载具(autonomous surface vehicles, ASVs)或自主水面舰艇(Autonomous surface crafts, ASCs),是一种无人为干涉情况下,能够在各种水面环境中完成特定任务的船艇。无人船艇作为一种

智能设备,其功能和工作领域与无人潜水器、无人飞机、浮动平台以及其他载人载具有些许重叠之处,但是其作为一种专门适应于水面工作而设计的设备,有许多优点是其他设备无法比拟的。

当前我国的河流、湖泊中,水面漂浮物和垃圾随处可见,严重影响水质,还对水生物的生存环境造成污染。但目前主要的打捞方式成本过高,对于

收稿日期: 2023-03-06

基金项目: 江苏水利科研项目(2018031)

作者简介: 谢开鑫(1998—),男,硕士,主要研究水面垃圾清理及水质监测特种机器人。E-mail: kaixin.xie-2022@outlook.com

通信作者: 肖怀前(1976—),男,正高级工程师,主要从事水利工程建设与管理工作。E-mail: 279487805@qq.com

处理分散的垃圾效率过低。因此,需要一种能追踪分散垃圾、精准定位、智能化的无人水面垃圾清理船。

## 2 国内外研究现状

### 2.1 国外研究现状

2002年,美国海军水下作战中心联合 Radix Marine 公司、Northrop Grumman 公司和 Raytheon 公司开发“Spartan Scout”号无人艇,该艇是一艘半自主式的无人船,全船模块化设计,船体采用的是可充气的单船体刚性船艇。2005年,以色列研发出“黄貂鱼(Stingary)”号无人艇,该艇续航时长可达8小时,并且隐蔽性好。2010年,新加坡研发出“Venus”号无人艇,该艇可根据作战需求搭载电子战模块、海上监视模块、火力控制模块等。

除了在军事方面的应用外,无人船艇在科研领域也发挥了作用。2007年意大利国家自动化研究所(CNR-ISSIA)研发出“ALANIS”号和“Charlie”号两艘无人艇原型机,这两艘无人艇的主要任务为对水文环境进行抽样调查。2008年美国圣塔克拉拉大学(SCU)和蒙特利湾水族馆研究所共同研制出了 Nereus 无人船,该船经过多次稳定性测试,稳定性良好。除上述几种无人船外,还有美国 Wave Glider 号无人船、英国 Blackfish 无人船、印度 ROSS 无人艇原型机、日本 UMV-H 和 UMV-0 无人艇等。

### 2.2 国内研究现状

国内最早在无人船艇方面进行研究的是沈阳新光公司,该公司在2006年引入 XG-2 型概念无人艇<sup>[1]</sup>,主要用于执行反潜任务。此外,在2008年的北京奥运会期间,该公司研发的“天象一号”无人艇<sup>[2]</sup>为奥运会提供了良好的气象服务,该船可在预定区域按照预定路线航行,并能避开路线上的障碍物。2010年,台湾海洋研究所研制出了“郑和 101”号无人艇<sup>[3]</sup>,该船具有高度的灵活性,能够进行各种近岸研究和海洋数据的收集。

### 2.3 存在问题

从国内外的的发展情况来看,无人艇的发展从舰艇船型、动力驱动、控制方法以及模块化设计等方面发展迅速<sup>[4-5]</sup>,然而以上技术主要面向军事领域,而对于水面垃圾清理等水利领域却涉足甚少。因此,本文主要针对无人船在水面垃圾清理方面存在定位误差大的问题,提出基于 UKF 的水面垃圾清理船定位方法。

## 3 基于 UKF 的水面垃圾清理船定位方法

### 3.1 无先导卡 Kalman 算法

针对无人船当前状态,若令  $W_0 = \frac{\lambda}{M+\lambda}$ , 则可得如下方程:

$$x_0 = \bar{x} \quad (1)$$

$$x_i = \bar{x} + \left( \sqrt{(M+\lambda)P_x} \right)_i, \quad i = 1, 2, \dots, M \quad (2)$$

$$x_i = \bar{x} - \left( \sqrt{(M+\lambda)P_x} \right)_{i-M}, \quad i = M+1, M+2, \dots, 2M \quad (3)$$

式中:  $x$  为当前状态变量;  $\bar{x}$  为状态点的集合均值;  $P_x$  为协方差矩阵;  $W_0$  为定义权重;  $\lambda = \alpha^2(M+\kappa) - M$  是一个标量参数; 常数  $\alpha$  决定  $x_i$  相对向量  $\bar{x}$  的均值扩散程度,它通常取值于  $0.001 < \alpha < 1$  的范围; 常数  $\kappa$  是第二个标量参数,它通常置为 0,这种选择在状态估计时最好。  $e_i = \left( \sqrt{(M+\lambda)P_x} \right)_i$  表示矩阵平方根的第  $i$  行。通过上述方法获得的  $2M+1$  个 sigma 点经过非线性函数变换

$$z_i = g(x_i), \quad i = 0, \dots, 2M \quad (4)$$

$z$  的均值和协方差矩阵可由下列公式逼近:

$$\bar{z} = \sum_{i=0}^{2M} W_i^m z_i \quad (5)$$

$$P_{zz} = \sum_{i=0}^{2M} W_i^c (z - \bar{z})(z - \bar{z})^T \quad (6)$$

$$W_i^c = \frac{1}{2(M+\lambda)}, \quad i = 1, 2, \dots, 2M \quad (7)$$

如果考虑参数  $\beta$  来调整高阶项,那么权重可以改写如下:

$$W_0^c = \frac{\lambda}{M+\lambda} + (1 - \alpha^2 + \beta) \quad (8)$$

$$W_i^m = \frac{1}{2(M+\lambda)}, \quad i = 1, 2, \dots, 2M \quad (9)$$

式中:  $\bar{z}$  为均值;  $W_i^c$  为协方差权重;  $W_0^c$  为协方差权重初始值;  $W_i^m$  为均值权重;  $\beta$  为参数。参数  $\beta$  考虑了向量  $x$  的先验分布信息。对高斯分布,  $\beta=2$  为最优的。将上述思想和 KF 算法结合,就是 UKF 算法如图 1。

### 3.2 无人船定位模型

无人船的位置观察序列(可能有偏差)预测出物体位置的坐标及速度。但目标的位置、速度、加速度的测量值往往都有噪声。卡尔曼滤波利用目标的动态信息,设法去掉噪声的影响,得到一个关于目标正确位置的估计。这个估计可以是对当前

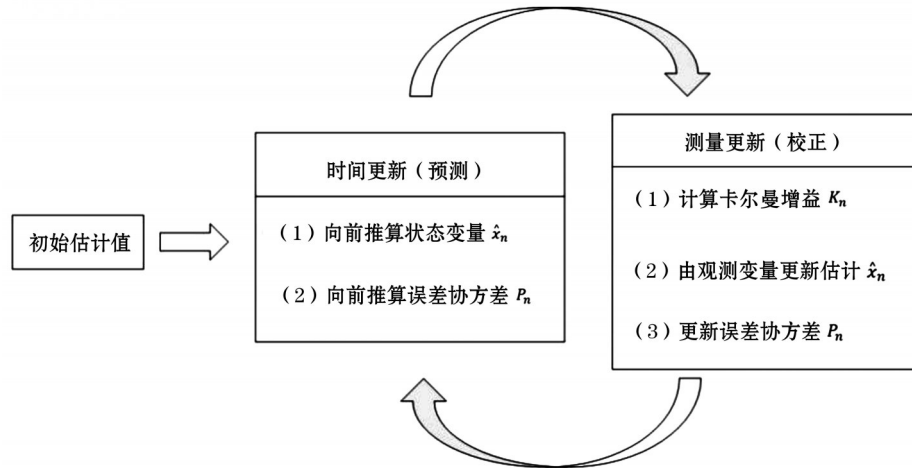


图1 UKF流程

目标位置的估计(滤波),也可以是对于将来位置的估计(预测),也可以是对过去位置的估计(插值或平滑)。

### 3.2.1 状态方程

假设跟踪的运动目标为一无人船,固定连接在无人船上的空间直角坐标系O-X-Y-Z,无人船的位置为空间某点A,控制导航系统在坐标系原点O处,取目标无人船的坐标为 $(x, y, z)$ ,速度为 $(v_x, v_y, v_z)$ ,其中 $v_z=0$ 。O为坐标原点; $\theta$ 为目标高低角; $\alpha$ 为目标运动方向与正北的夹角; $\beta$ 为目标方位角; $z$ 为水平面高度。定义状态矢量 $X(t)=[x, v_x, y, v_y, z]^T$ ,则可定义状态方程为

$$X'(t)=AX(t) \quad (10)$$

将上式离散化并考虑模型噪声,即得离散系统的状态方程:

$$X(k+1)=\Phi(k+1,k)X(k)+W(k) \quad (11)$$

其中:

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (12)$$

$$\Phi(k+1,k) = \begin{bmatrix} 1 & T & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & T & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (13)$$

式中: $A$ 为状态转换矩阵; $\Phi(k+1,k)$ 为离散状态转换矩阵; $k=0,1,2$ ,表示图像帧序列号; $T=t_{k+1}-t_k$ ,为对应的图像序列采集的帧时间间隔;模型噪声 $W(k)=[0, w_1(k), 0, w_2(k), 0]^T$ ,通常假设噪声项各分量都是互不相关的零均值白噪声, $E\{W(k)\}=0$ ,且其协方

差阵为 $E\{W(k)W^T(j)\}=Q(k)\delta_{kj}$ ,其中 $\delta_{kj}$ 是克罗尼克函数:

$$\begin{cases} \delta_{kj} = 1, (k=j) \\ \delta_{kj} = 0, (k \neq j) \end{cases} \quad (14)$$

### 3.2.2 测量方程

测量方程为测量值和目标运动状态之间的关系描述。

$$z(k)=H[X(k)]+V(k)=\begin{bmatrix} \theta \\ \beta \end{bmatrix}+V(k) \quad (15)$$

式中: $H$ 为测量协方差矩阵; $V(k)$ 为观测噪声。

卡尔曼滤波器是经过迭代运算实现的,其中,状态误差协方差矩阵的初始值、系统噪声方差的初始值及测量噪声值的选取对卡尔曼滤波器的性能有一定的影响。在直角坐标下,系统的运动状态方程是线性的,而量测方程是非线性的,因此,将量测方程中的观测矩阵进行线性化。

## 4 仿真与实验

### 4.1 数值分析

假定飞行器运动状态为匀速运动,物体的状态空间包括主体位置 $(x, y)$ ,速度 $(\dot{x}, \dot{y})$ 。相对于雷达其初始位置为 $(-10\ 000\text{ m}, 20\ 000\text{ m})$ ,运行速度为 $(100\text{ m/s}, -200\text{ m/s})$ 。同时对两个方向上的速度进行观测,便可以获得完整的观测数据。距离测量误差为 $60\text{ m}$ ,角度测量误差为 $1^\circ$ 。

目标的运动状态方程为

$$X(k+1)=F(k)X(k)+\Gamma(k)v(k) \quad (16)$$

式中:

$$X(k)=[x, y, \dot{x}, \dot{y}] \quad (17)$$

$$F(k) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & T & 0 \\ 0 & 1 & 0 & T \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (18)$$

$$\Gamma(k) = \begin{bmatrix} 0.5T^2 & 0 \\ 0 & 0.5T^2 \\ T & 0 \\ 0 & T \end{bmatrix} \quad (19)$$

式中:  $F(k)$  为状态转移矩阵;  $X(k)$  为系统状态变量;  $\Gamma(k)$  为噪声分布矩阵;  $v(k)$  为系统噪声测量值。

滤波器采用一阶模型, 此时测量方程为

$$Z(k) = h[X(k)] + W(k) \quad (20)$$

式中:  $h[X(k)] = \begin{bmatrix} \sqrt{x(k)^2 + y(k)^2} \\ \tan^{-1}\left(\frac{y(k)}{x(k)}\right) \end{bmatrix}$ ,  $Z(k) = [\rho(k), \theta(k)]'$ , 并假定

$W(k)$  是与  $V(k)$  相互独立的零均值高斯噪声, 其

协方差阵为  $R(k) = \begin{bmatrix} \sigma_\rho^2 & 0 \\ 0 & \sigma_\theta^2 \end{bmatrix}$ 。

目标初始估计状态及对应的协方差矩阵如下:

$$\bar{x} = \begin{bmatrix} -10200 \\ 20300 \\ 100 \\ -200 \end{bmatrix} \quad (21)$$

$$P_0 = \begin{bmatrix} 50000 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 50000 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 800 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 800 \end{bmatrix} \quad (22)$$

将以上初始条件及协方差矩阵, 代入 UKF 算法中进行无人船位置追踪, 得出结果所图 2。

#### 4.2 样机实验

根据以上理论计算, 在科研项目“水面垃圾清理与水质监测特种机器人研制”中研发了真实无人船样机, 在二河闸下游水面多次开展真机实验, 进行了数据实测与分析。

通过真实数据测量, 进行 UKF 样机实测与分析, 得到如下的实测定位数据图, 由图 3 可知, 实测数据与仿真分析的数据极度吻合, 因此本实验是有效的。

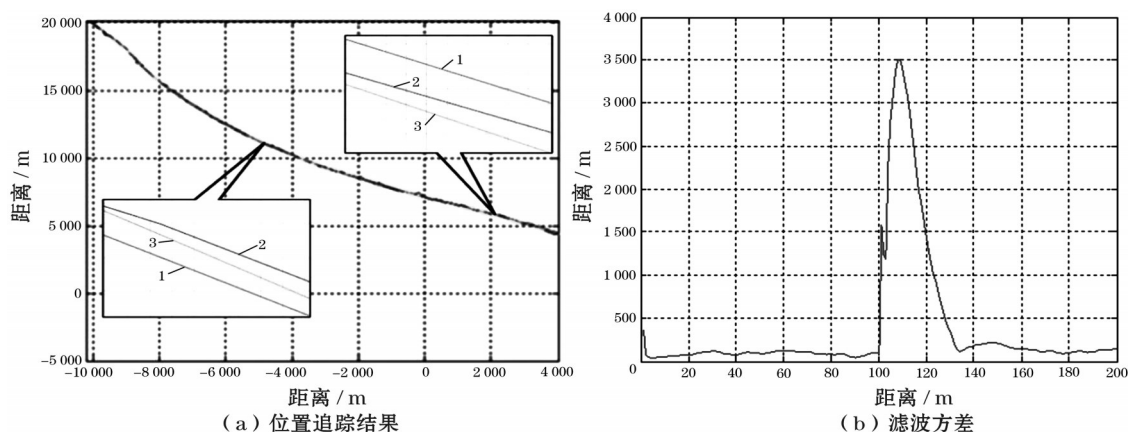


图2 位置追踪结果与滤波方差(其中1号线为真实值,2号线为预测值,3号线为滤波值)

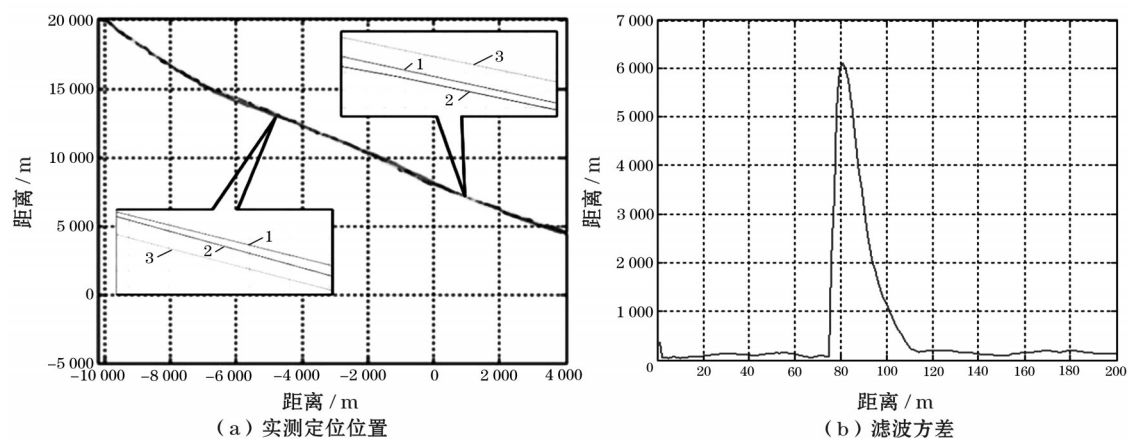


图3 实测定位数据与滤波方差(其中1号线为真实值,2号线为预测值,3号线为滤波值)



## 5 结 语

随着当前科技的快速发展,关于无人船的研究领域在不断扩展。本文针对无人船在水面垃圾清理时的定位问题,重点研究了无人船的动态定位与追踪,提出了基于无先导UKF的无人船定位方法,并通过仿真与实验论证了本方法的有效性,使无人船可以更加高效地清理分散的漂浮物和垃圾,大大降低清理成本。

### 参考文献:

- [1] 张树凯,刘正江,张显库,等. 无人船艇的发展及展望[J]. 世界海运,2015(9):29-36.
- [2] YANG W R, CHEN C Y, HSU C M, et al. Multifunctional

inshore survey platform with unmanned surface vehicles [J]. Automation and Smart Technology, 2011, 1(2): 19-25.

- [3] AKSHAT KUMAR, JITENDRA KURMI. Micro aquatic drones in the perspective of robotics: a review [J]. International Journal of Advanced Research in Computer Science, 2018, 9(2): 90-94.
- [4] AKSHAT KUMAR, JITENDRA KURMI. A review on unmanned water surface vehicle [J]. International Journal of Advanced Research in Computer Science, 2018, 9(2): 95-99.
- [5] JINGYEONG HEO, JUNGHOON KIM, YONGJIN KWON. Analysis of design directions for unmanned surface vehicles (USVs) [J]. Computer and Communications, 2017 (5): 92-100.

(上接第42页)

时取景并显示叠加的数字图像,这就是移动手持式显示器的一般工作情况;可穿戴式的就是戴在头上,类似眼镜的头盔显示器。设计的2个场景用到的就是移动手持显示,通过这种方式,可以让巡检人员更加自然地体验增强现实,同时为巡检人员提供基于用户本身更强更真的感觉。

场景1:秦淮新河泵站1#机组开关柜;这个场景是水利工程巡检人员最为熟悉的场景,进入该类场景后,巡检人员携带AR手持终端扫描这个开关柜,相应开关柜所有的技术参数均能即刻展示在巡检人员面前,包括这个开关柜的电流、电压、温度等即时数据和历史数据。同时,还可以利用AR巡检设备进行一系列的巡检操作,巡检人员对照检查内容,认真查看开关柜中显示的数据(温度、电流、电压)是否有异常,并调取历史数据进行比对,查看指示灯是否有损坏,在检查过程中若发现有异常情况,还可利用AR手持终端拍摄图片或者视频上传至系统后台,以便于维护人员及时维护。

场景2:秦淮新河泵站1#水泵机组;这个场景比较特殊,在探索研究阶段利用高密度树脂材料,采用3D打印技术打印了该水泵机组模型。工程运行现场水泵机组大部分的零部件都是埋藏在混凝土里面,巡检过程中工作人员看不见水泵机组的整体面貌,但是如果利用AR手持终端扫描当下这个水泵机组模型场景后,该水泵机组所有的构造,包括

零部件的信息以及实时参数均可查看,尤其是一些隐蔽的部位都能在对现实空间中详细展出,这样巡检工作人员在巡检的过程中能够掌握所有的设备信息,以便现场做出更为合理的判断。

## 5 结 语

通过对目前水利工程设备的调查分析可知,在日常工作中,操作人员、维修人员巡检工作主要是巡查设备有无问题,而真正影响设备的性能参数却无法在传统巡查过程中及时掌握。本文继续探索设备智能巡检系统,在遵循设备原理基础上,重点巡检容易造成设备发生故障的最重要内部参数指标,建立基于AR技术的在线巡检系统,并采用计算机方法和场景重现对该系统方案进行仿真模拟<sup>[4]</sup>,以验证本方案的有效性,后期将AR智能巡检系统应用在水利设备的智能化巡检中。

### 参考文献:

- [1] 李子阳. 基于AR的智能安全巡检系统[J]. 北京化工大学学报, 2022(5): 59-66
- [2] 孙勇. 基于物联网技术的水利工程智能巡检系统[J]. 江苏水利, 2019(8): 51-56
- [3] 李大勇. 基于AR技术的变电站智能巡检系统设计与实现[J]. 微型电脑应用, 2020(8): 92-94
- [4] 何智频. 基于AR技术的电力设备智能巡检探讨[J]. 技术分析, 2020(11): 88-89.