doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.07.005

基于 IPSO - UKF 的水草清理作业船组合导航定位方法

阮承治[1,2]　赵德安[2,3]　刘晓洋[2]　陈　旭[2]　姬　伟[2,3]　贾伟宽[2]

(1.武夷学院机电工程学院, 武夷山 354300; 2.江苏大学电气信息工程学院, 镇江 212013;
3.江苏大学机械工业设施农业测控技术与装备重点实验室, 镇江 212013)

摘要: 在河蟹养殖水草清理过程中,为降低养殖户劳动强度和提高导航定位精度,研究结合 DGPS 和视觉导航的优点,设计一种用免疫粒子群算法(IPSO)来优化无迹卡尔曼滤波(UKF)的组合导航定位方法,并应用于水草清理作业船。首先通过建立组合导航模型,得到系统的状态方程和量测方程;为解决 UKF 对导航模型滤波存在的发散问题,再通过粒子群算法(PSO)优化 UKF,并引入免疫算法避免 PSO 的早熟现象;最后得到滤波后新的位置坐标。为获取视觉信息,对采集的图像采用相应的图像处理技术确定导航路径。导航实验结果表明,所提方法相比 DGPS 导航和组合导航,纬度误差分别下降 22.69%、9.14%,工作时间分别减少 4.77%、4.32%,进一步提高了作业船工作效率。

关键词: 河蟹养殖; 水草清理作业船; 视觉导航; DGPS; IPSO - UKF

中图分类号: TP2; TP391　　**文献标识码**: A　　**文章编号**: 1000-1298(2017)07-0038-08

Integrated Navigation Positioning Method Based on IPSO - UKF for Aquatic Plants Cleaning Workboat

RUAN Chengzhi[1,2]　ZHAO Dean[2,3]　LIU Xiaoyang[2]　CHEN Xu[2]　JI Wei[2,3]　JIA Weikuan[2]

(1. *School of Mechanical and Electrical Engineering, Wuyi University, Wuyishan* 354300, *China*
2. *School of Electrical and Information Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang* 212013, *China*
3. *Key Laboratory of Facility Agriculture Measurement and Control Technology and Equipment of Machinery Industry, Jiangsu University, Zhenjiang* 212013, *China*)

Abstract: In the aquatic plants cleaning process of crab culture, in order to reduce labor intensity of the farmers and improve the positioning accuracy of navigation, a kind of DGPS and vision integrated navigation positioning method was designed with immune particle swarm optimization (IPSO) to optimize the trace of Kalman filter, which combined the advantages of DGPS and visual navigation, and was applied to aquatic plants cleaning workboat. Firstly, the integrated navigation model was established, and then the state equation and observation equation of the system were obtained. In order to solve the divergence problem of UKF filtering for navigation model, PSO was used to obtain new particles, and immune algorithm was introduced to avoid premature phenomenon of PSO. Combining with UKF, the navigation model was filtered, and the new position coordinates were obtained. At last, the comparative experiment was conducted by simulation and navigation experiment. Simulation experiment results showed that the root mean square error (RMSE) at east and north positions of the proposed method were reduced by 46.09% and 71.51% compared with DGPS navigation, and reduced by 23.92% and 58.26% compared with integrated navigation, respectively. Navigation experiment results showed that in the same longitude position the latitude error of proposed method was reduced by 22.69% and 9.14% compared with DGPS and integrated navigation, respectively. The results showed that the navigation time of the proposed method was reduced by 4.77% and 4.32% compared with DGPS and integrated navigation, respectively.

Key words: crab culture; aquatic plants cleaning workboat; visual navigation; DGPS; IPSO - UKF

收稿日期: 2016 - 12 - 27　修回日期: 2017 - 01 - 21

基金项目: 国家自然科学基金项目(31571571、61573170)、高等学校博士学科点专项科研基金项目(20133227110024)、江苏省高校优势学科建设项目(PAPD)、镇江市重点研发(现代农业)计划项目(NY2015022)、江苏省普通高校研究生科研创新计划项目(KYLX15_1075)、福建省教育厅中青年项目(JAT160506)和武夷学院校科研基金项目(XD201504)

作者简介: 阮承治(1984—),男,讲师,江苏大学博士生,主要从事智能控制和图像处理研究,E-mail: ruanczhi@163.com

通信作者: 赵德安(1956—),男,教授,博士生导师,主要从事智能控制和智能机器人研究,E-mail: dazhao@ujs.edu.cn

引言

河蟹具有极高的营养价值和经济价值[1]。2014 年，我国河蟹养殖面积达到 53.33 万 hm^2，位居世界第一，且养殖规模逐年提高[2]。在河蟹养殖中，水草能为河蟹提供天然饵料以及栖息、蜕壳的场所[3]；适量的水草能净化水质，提高溶解氧含量，从而促进河蟹的生长和发育[4]。然而，高温时段水草生长迅猛，过量的水草极易导致水草死亡，恶化水质，影响河蟹的健康生长[3,5]。已有研究表明，在河蟹养殖中，悬浮的水草顶端低于水面 20 cm 左右较理想[6]。因而，水草的收割与清理在河蟹养殖中具有重要意义。

随着养殖业人员的减少和养殖规模的扩大，高效的全自动作业船成为一种理想的水草清理农机装备，而实现作业船的自主导航是自动作业的关键。目前在研的作业船主要采用 DGPS 导航，该种模式只能按照预置的航线行驶，但水草未必均在预置的航线上，以致漏割率较高，作业船工作效率不高[3]。采用视觉信息模拟人眼功能，通过采集的图像对目标进行处理，并运用获取的视觉信息确定航行轨迹的方法，可应用于水草清理农机装备[7-9]。本文结合 DGPS 和视觉导航的优点，建立一种组合导航方法，以更好地提高作业船定位精度和工作效率。

然而，在组合导航技术研究中，系统噪声、DGPS 本身误差等因素也会影响作业船的导航精度[10]。为提高导航精度，广泛采用无迹卡尔曼滤波（UKF）对系统状态进行估计[11]。但传统的 UKF 在噪声未知的情况下，对非线性系统难以获得满意的效果[12-13]。为此，本研究拟引入粒子群算法（PSO）对其进行优化。但 PSO 算法在优化过程中存在早熟现象[14-15]，故在 PSO 算法基础上，通过引入免疫算法（Immune algorithm）来加强自我调节功能，改善粒子的多样性，避免早熟，即免疫粒子群算法（IPSO）。因此，本文引入 IPSO 来优化 UKF，提出一种基于 IPSO－UKF 的水草清理作业船组合导航定位方法。

1　组合导航模型

在组合导航系统中，为提高作业船导航精度和定位效果，应先对作业船建立合适的模型。

1.1　状态方程

针对水草清理作业船组合导航研究，需建立作业船航行时的视觉坐标系和世界坐标系[7]，建立的坐标系如图 1 所示。

图 1 中以船的当前位置及目标位置为对象，定义系统状态方程。设导航系统状态向量为 $\boldsymbol{X}_k$，$\boldsymbol{X}_k$ 中存在 4 个主要的状态量，即

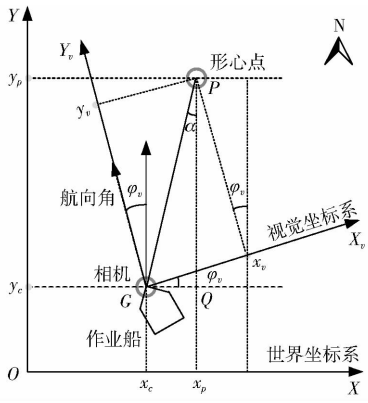

图 1　坐标系

Fig. 1　Coordinate system

$$\boldsymbol{X}_k = \boldsymbol{X}(kT) = (x_c(kT), y_c(kT), x_p(kT), y_p(kT)) \quad (k = 1, 2, \cdots, n) \tag{1}$$

式中　$x_c(kT)$、$y_c(kT)$——kT 时刻作业船的东向位置和北向位置

$x_p(kT)$、$y_p(kT)$——目标点在世界坐标系中的位置坐标

T——采样周期

因作业船在水面行驶，天向位置可忽略不计。通过 $x_c(kT)$、$y_c(kT)$、$x_p(kT)$、$y_p(kT)$ 4 个状态量即可确定作业船的位置及航向角度。作业船在航行过程中基本保持匀速行驶，作业船状态方程模型定义为

$$\boldsymbol{X}_k = \boldsymbol{\phi}\boldsymbol{X}_{k-1} + \boldsymbol{\Psi}\boldsymbol{W}_{k-1} \tag{2}$$

式中　$\boldsymbol{W}_{k-1}$——模型误差及外界扰动引起的系统噪声

$\boldsymbol{\phi}$——确定 $k-1$ 时刻至 k 时刻的状态转移矩阵

$\boldsymbol{\Psi}$——系统状态噪声矩阵

系统噪声均值和方差估计矩阵可表示为

$$\begin{cases} E[\boldsymbol{W}_k] = 0 \\ E[\boldsymbol{W}_k \boldsymbol{W}_j^{\mathrm{T}}] = \boldsymbol{Q}_k \delta_{kj} \end{cases} \tag{3}$$

式中　$\boldsymbol{Q}_k$——系统噪声 $\boldsymbol{W}_k$ 的对称非负方差矩阵

δ_{kj}——Kronecker-δ 函数

$E[\boldsymbol{W}_k]$——系统噪声均值

$E[\boldsymbol{W}_k \boldsymbol{W}_j^{\mathrm{T}}]$——系统噪声方差估计矩阵

1.2　量测方程

定义方位角为 PG 与 PQ 之间的夹角，用 α 表示，如图 1 所示，计算式为

$$\alpha(kT) = \arctan\frac{x_p - x_c}{y_p - y_c} \tag{4}$$

则作业船导航系统的量测方程可表示为

$$\alpha(kT) = \arctan\frac{x_p - x_c}{y_p - y_c} + v(t) \tag{5}$$

式中 $v(t)$——方位角 α 的量测噪声

系统量测噪声均值和方差估计矩阵可表示为

$$\begin{cases} E[\boldsymbol{v}(kT)] = 0 \\ E[\boldsymbol{v}(kT)\boldsymbol{v}(jT)^{\mathrm{T}}] = \boldsymbol{R}_k\delta_{kj} \end{cases} \tag{6}$$

式中 $\boldsymbol{R}_k$——量测噪声的方差矩阵

$E[\boldsymbol{v}(kT)]$——量测噪声均值

$E[\boldsymbol{v}(kT)\boldsymbol{v}(jT)^{\mathrm{T}}]$——量测噪声方差估计矩阵

2 IPSO - UKF 算法

在导航定位中,常采用 UKF 对系统状态进行估计[16]。但 UKF 在噪声未知的情况下,非线性滤波与估计存在精度下降和发散等问题[17]。PSO 是一种有效的全局寻优算法,广泛应用于系统优化[18]。但 PSO 在优化过程中存在早熟现象,拟引入免疫算法来改善粒子多样性,避免 PSO 陷入局部极值[19]。因此,本研究提出 IPSO - UKF 的作业船组合导航定位方法。

2.1 IPSO 基本原理

IPSO 算法流程如图 2 所示,主要分为 PSO 优化与基于免疫浓度调节两部分。PSO 基本原理是:在一个 D 维的目标搜索空间中,一个由 N 个粒子组成的群体,每个粒子 i 在 D 维空间的坐标为 z_i,每个粒子的位置就是一个潜在解。将 z_i 代入一个目标函数,并计算其适应度[20]。粒子 i 的速度为每次迭代中移动的距离 v_i,则粒子速度和位置更新方程为

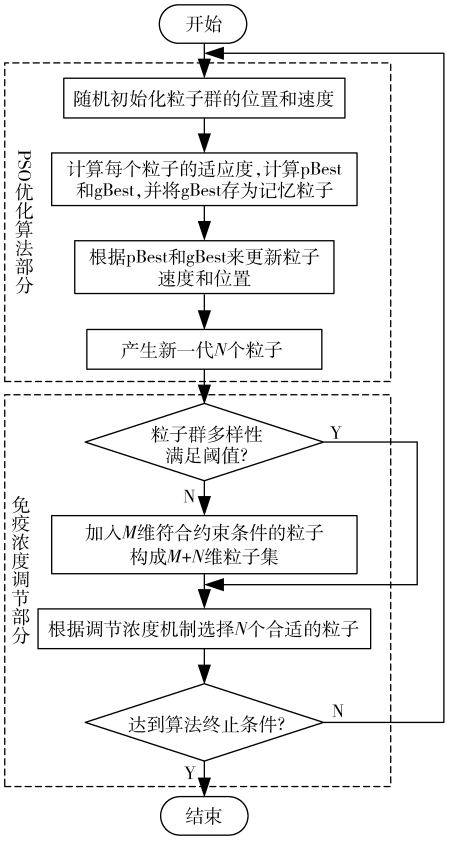

图 2 IPSO 算法流程图

Fig. 2 Flow chart of IPSO algorithm

$$v_{id}(t+1) = \omega v_{id}(t) + \eta_1 r_1(p_{id} - z_{id}(t)) + \eta_2 r_2(g_{id} - z_{id}(t)) \tag{7}$$

$$z_{id}(t+1) = z_{id}(t) + v_{id}(t+1) \tag{8}$$

式中 ω——惯性权重

η_1、η_2——加速度常数

r_1、r_2——学习因子

$v_{id}(t)$——i 粒子在 d 位置的速度

p_{id}——个体极值

$z_{id}(t)$——i 粒子在 d 位置的坐标

g_{id}——全局极值

$z_{id}(t+1)$——下一时刻 i 粒子 d 位置坐标

$v_{id}(t+1)$——下一时刻 i 粒子 d 位置速度

基于免疫浓度调节部分使各个适应度层次的抗体保持一定的浓度,根据适应度函数计算粒子浓度,然后对 $M+N$ 个粒子进行排序,取前 N 个粒子作为下一代进化粒子[21]。该算法中,第 i 个抗体浓度的计算公式为

$$S(\boldsymbol{X}_i) = \frac{1}{\sum_{j=1}^{M+N} |f(\boldsymbol{X}_i) - f(\boldsymbol{X}_j)|} \quad (i = 1,2,\cdots,M+N) \tag{9}$$

式中 $f(\boldsymbol{X}_i)$、$f(\boldsymbol{X}_j)$——各抗体的适应度计算函数

基于抗体浓度的概率选择公式为

$$P(\boldsymbol{X}_i) = \frac{\frac{1}{S(\boldsymbol{X}_i)}}{\sum_{i=1}^{M+N}\frac{1}{S(\boldsymbol{X}_i)}} = \frac{\sum_{j=1}^{M+N}|f(\boldsymbol{X}_i) - f(\boldsymbol{X}_j)|}{\sum_{i=1}^{M+N}\sum_{j=1}^{M+N}|f(\boldsymbol{X}_i) - f(\boldsymbol{X}_j)|} \tag{10}$$

对于组合导航定位滤波来说,选择合适的适应度函数至关重要[22]。在本系统中,设滤波器输出的位置信息的理想值为 $\boldsymbol{X}_k$,选择优化目标即适应度函数为所设计的滤波器输出值 $\hat{x}_k$ 与理想输出值 $\boldsymbol{X}_k$ 的均方差 E,即

$$E = \sum_{k=1}^{m}(|\hat{x}_k| - |\boldsymbol{X}_k|)^2 \tag{11}$$

2.2 UKF 算法

UKF 算法是利用 UT 变换在估计点附近确定采样点[23],采样点是通过 UT 变换在原状态分布中按某一规则选取的点集,即 Sigma 点集[24]。

本系统中状态向量如式(1)所示,通过 UT 变换得到 $2n+1$ 个 Sigma 点

$$\boldsymbol{X}_i=\begin{cases}\overline{\boldsymbol{X}} & (i=0)\\ \overline{\boldsymbol{X}}+(\sqrt{(n+\lambda)\boldsymbol{P}})_i & (i=1,2,\cdots,n)\\ \overline{\boldsymbol{X}}-(\sqrt{(n+\lambda)\boldsymbol{P}})_i & (i=n+1,n+2,\cdots,2n)\end{cases} \tag{12}$$

其中　　$(\sqrt{\boldsymbol{P}})^{\mathrm{T}}(\sqrt{\boldsymbol{P}})=\boldsymbol{P}$

式中　$(\sqrt{\boldsymbol{P}})_i$——矩阵方根的第 i 列

n——状态维数

λ——缩放比例系数

$\overline{\boldsymbol{X}}$——估计均值

得到相应的权值 ω 为

$$\begin{cases}\omega_m^{(0)}=\dfrac{\lambda}{n+\lambda}\\ \omega_c^{(0)}=\dfrac{\lambda}{n+\lambda}+(1-a^2+\beta)\\ \omega_m^{(j)}=\omega_c^{(j)}=\dfrac{\lambda}{2(n+\lambda)}\quad (j=1,2,\cdots,2n)\end{cases} \tag{13}$$

式中　m——均值　　c——协方差

j——采样点　　β——权系数

a——采样点的分布状态

2.3　IPSO－UKF 算法

根据建立的组合导航模型，设计 IPSO－UKF 算法流程为：

(1)初始化 PSO 算法中的参数，包括加权因子、群体大小和参数维数等。

(2)在参数区间内随机初始化各粒子的速度和位置。

(3)利用式(12)、(13)获得一组 Sigma 点集及对应的权值。

(4)根据免疫粒子群优化算法中的速度和位置更新方程，即更新式(7)、(8)的粒子适应度值，并将此时的 gBest 作为免疫记忆因子存入记忆库，并判断粒子种群多样性是否满足阈值。

(5)随机生成符合条件的 M 个新粒子，与步骤(4)生成的粒子集合一起构成新的粒子集合，根据式(11)计算各个粒子的均方差。根据均方差按照式(9)、(10)分别计算粒子的浓度和选择概率，按照选择概率从大到小排序，选择前 N 个粒子构成粒子集合。

(6)计算 $2n+1$ 个 Sigma 点集的一步预测，并计算系统状态量的一步预测及协方差矩阵。

(7)根据一步预测值，再次使用 UT 变换，产生新的 Sigma 点集，并代入观测方程，得到观测值。

(8)由步骤(7)得到观测值，通过加权求和得到系统预测的均值及协方差。

(9)计算 Kalman 增益矩阵。

(10)计算系统的状态更新和协方差更新，得到新的位置坐标。

3　实验与结果分析

3.1　图像处理实验

3.1.1　图像采集

图像采集时间为 2015 年 7 月，采集地点是江苏省兴化市安丰镇河蟹养殖基地。

处理与分析图像的计算机配置：Intel Core 2 Duo CPU E7300 2.66 GHz，RAM 3.24 GB，操作系统为 Microsoft Windows 7，显卡为 Intel ® G33/G31 ECF；图像处理软件为 Matlab R2014a。

图像采集系统中使用的工业摄像头型号为 KBE－RT6200E/S，焦距为 3.9～85.8 mm，视场角为 −6°～54°，通光孔径为 F1.6－C，像面尺寸为 1/3，最小物距为 0.15 m。为消除水面反光对图像采集质量的影响，在摄像头前端加上偏振片。

3.1.2　图像处理流程

在本系统中利用采集的图像信息分割出水草目标，并确定水草区域的形心，通过形心进行直线拟合，并提取视觉导航基准线。图像处理主要流程如图 3 所示。

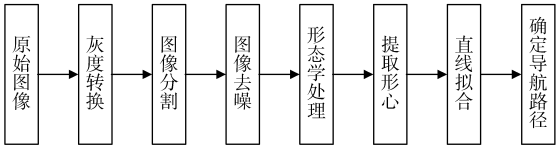

图 3　图像处理主要流程

Fig. 3　Main flow chart of image processing

3.1.3　基准线的提取

在图像处理实验中，图像均为 512 像素×512 像素的.bmp 图像，共采集 30 幅图像。图像采用 PSO 优化脉冲耦合神经网络分割(PSO－PCNN)方法，PCNN 是一种仿生物视觉特性的人工神经网络，采用 PSO 寻优的方式设置 PCNN 内部参数以得到最优图像分割效果[25－26]。图像降噪选用 3×3 算术均值滤波窗口。形态学处理中，膨胀选用 1×3 模板，腐蚀选用 3×1 模板。在图像中分割出目标区域后，通过调用 Matlab 工具箱中的 regionprops 函数，可以得到水草区域形心。

在 Matlab 环境下，使用该流程 1 幅图像平均运行时间为 852 ms。图像处理结果如图 4 所示。从实验结果来看，该算法能有效地分割出目标区域，通过提取目标形心，得到理想的视觉导航基准线。

3.2　仿真实验

为验证 IPSO－UKF 滤波组合导航效果，采用 3 种导航方式做比较实验，3 种导航方式为 DGPS 导

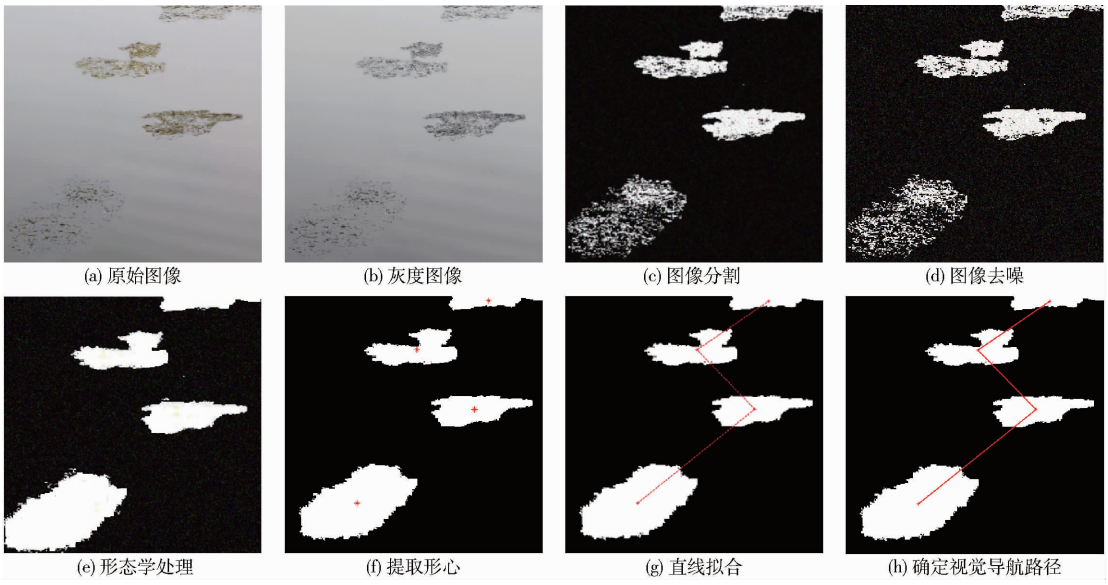

图 4 图像处理结果

Fig. 4 Results of image processing

航、组合导航和 IPSO - UKF 组合导航。

仿真实验参数设定:DGPS 采用的是 RTK 差分定位的方式,DGPS 的位置测量误差为 3 ~ 5 cm,RTK 量测噪声和系统状态噪声分别是标准差为 0.05 和 0.01 的零均值高斯白噪声,实验时间均为 300 s,3 种导航方法设定的初始位置、目标区域形心位置都相同。以拟合的视觉导航路径为基准,若刚好沿理想导航路径行驶,则其位置误差为零。系统每隔 1 s 进行一次数据采样并记录。

记录的数据为坐标转换后作业船东向和北向的位置坐标,东向、北向位置误差是影响定位精度的主要因素,位置误差如图 5、图 6 所示。

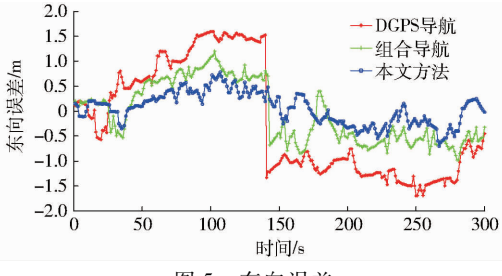

图 5 东向误差

Fig. 5 Eastward error

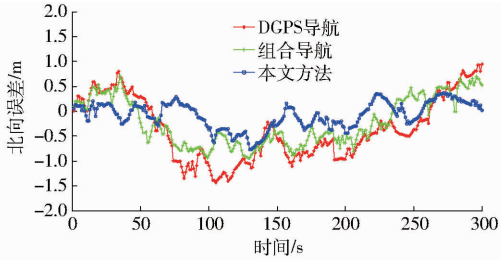

图 6 北向误差

Fig. 6 Northbound error

由图 5、图 6 可以看出,在 0 ~ 20 s 时间段,3 种导航模式的东向、北向偏差都较小。但随着实验的进行,DGPS 导航模式误差逐渐增大;组合导航模式误差也较大;IPSO - UKF 滤波的组合导航方法减少了视觉定位信息中的一些干扰,导航运行轨迹最为理想。

根据图 5、图 6 的仿真数据,计算获得 3 种导航方法的东向和北向均方根误差(RMSE),结果如表 1 所示。由表 1 可得,IPSO - UKF 组合导航的位置误差最小,相比 DGPS 导航方法的东向和北向位置 RMSE 分别下降了 46.09%、71.51%,相比组合导航方法东向和北向位置 RMSE 分别下降了 23.92%、58.26%。

表 1 RMSE 对比

Tab. 1 RMSE comparison m

导航方式	均方根误差	
	东向	北向
DGPS 导航	1.124 1	0.631 8
组合导航	0.606 0	0.480 7
IPSO - UKF 组合导航	0.320 2	0.263 7

在仿真实验中,目标形心与 DGPS 导航路径之间主要存在 3 种位置关系:形心与 DGPS 导航路径重合,形心在 DGPS 导航路径的右下方和左上方。从图 5 和图 6 看,当目标靠近 DGPS 导航路径右下方(65 ~ 140 s 时间段)时,东向位置误差相对较大;当目标靠近 DGPS 导航路径左上方(200 ~ 270 s 时间段),北向位置误差相对较大。由表 1 可得,东向位置误差总体上比北向位置误差大。可见,目标形心更多的集中于 DGPS 导航路径的右下方,与仿真设置的目标位置相符合。且从表 1 可以看出,目标偏离导航路径越远,本文所提出的方法效果越好。

3.3　导航实验

3.3.1　实验平台

水草清理作业船如图 7 所示。作业船主要由船体、水草清理装置、明轮驱动装置等部分构成，作业船船体尺寸为 4.0 m×1.6 m×1.2 m，空载吃水深度为 0.35 m，使用单船体设计。船头放置切割与输送装置；船体中间为集草舱，存放收集的水草；在船体两侧安装可正反转的明轮作为动力装置，可以实现 360°原地转弯；主控制器采用的是 ARM9 嵌入式 mini2440，配置 Linux 操作系统，液晶屏显示电池电量等信息和电子地图导航等操作界面，并能预定轨迹；本系统所有装置均由一个容量为 120 AH 的 48 V 锂电池驱动；系统中 DGPS 导航模块选用 BD982 型，采用 RTK 差分定位方式。



图 7　水草清理作业船

Fig. 7　Aquatic plants cleaning workboat

3.3.2　导航实验设计

针对蟹塘水草分布的特点，通过地理信息系统（GIS）显示池塘水域的经纬度坐标，在系统界面中设置目标航点，即预置航线。系统再通过图像检测水草目标形心的方法来判断作业船附近是否有水草，并根据图像检测结果选择导航方式：若图像检测无水草，则采用 DGPS 导航；若有水草存在，则采用视觉导航。在设计过程中，视觉信息中的视觉坐标需要进行坐标转换为世界坐标，坐标系进行统一。统一坐标后的位置信息经本文方法进行优化后得到新的位置坐标。

3.3.3　导航实验

为进一步验证所提导航算法的有效性和实用性，按照仿真实验的 3 种导航方法，于 2016 年 9 月在江苏省兴化市安丰镇河蟹养殖基地进行多次重复导航实验。图 8～10 中，1～5 是 DGPS 给定位置，A～E 是水草区域的形心。A～E 和 1～5 统称为目标位置，其中 1、5 是起止点。连接的红色虚线是 DGPS 给定的航线，黄色曲线为作业船实际航行轨迹。

DGPS 导航结果如图 8 所示，作业船采用该方法虽能基本完成给定的航线，但因水草未必在 1～5 所在的路径上，从图 8 可以看出，导航路径与水草形心 A～E 均具有一定的距离，故采用该种方法很难有较好的水草清理效果。

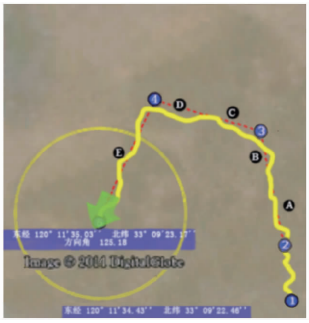

图 8　DGPS 导航实验结果

Fig. 8　Experiment result of DGPS navigation

组合导航如图 9 所示。组合导航与 DGPS 导航比较，对清理水草的效果有进一步的提高。开始阶段因视觉系统未获得目标信息，依靠的是 DGPS 导航，导航路径有一定幅度的振荡；至位置 1 后，获得 A 点的视觉信息；1→A 段，作业船未完全到达 A 点即向 B 点航行。从轨迹图上看，该方法清理水草效果比 DGPS 导航的效果更好，但该方法系统跟踪的精度性不够，而且导航路径没有完全行驶经过水草形心点，清理水草效果还有待提高。



图 9　组合导航实验结果

Fig. 9　Experiment result of integrated navigation

基于 IPSO－UKF 的组合导航结果如图 10 所示。从整个导航过程来看，本文方法定位精度和跟踪效果又有进一步的提高。从轨迹图上看，作业船能基本按照理想轨迹运行，导航路径能基本通过水草图像形心点，水草收割效果相比前两种方法有较

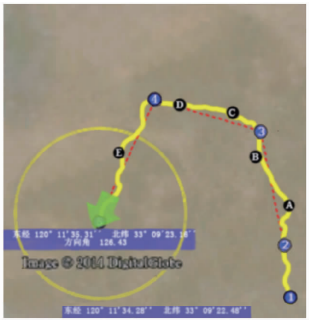

图 10　IPSO－UKF 组合导航实验结果

Fig. 10　Experiment result of integrated navigation based on IPSO－UKF

大程度的提高。

图 8 ~ 10 中的运行轨迹通过电子地图读出经纬度,并在直角坐标系中作图,得到经纬度坐标图,结果如图 11 所示,图中黑点代表 1 ~ 5 及 A ~ D 位置(即目标位置)。

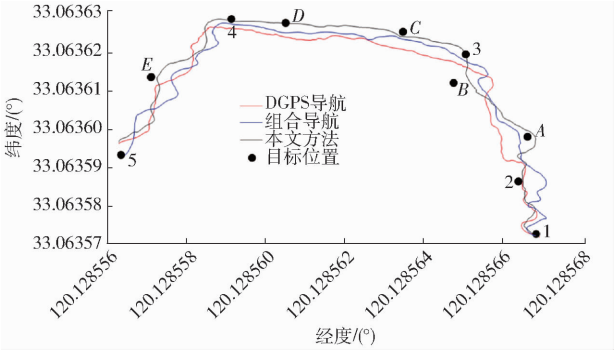

图 11 经纬度坐标图

Fig. 11 Latitude and longitude coordinates

在图 11 中,以 1 ~ 5 及 A ~ E 的目标位置的经纬度为对象计算导航误差。为计算和分析方便,测定实际导航时与目标位置相同经度位置处的纬度 L(多处位置则以与目标位置最近的纬度为准),再与目标位置的纬度比较,分别计算 3 种导航方法的纬度误差 δ_L,计算结果如表 2 所示。

从表 2 可知,本文方法相比 DGPS 导航和组合导航纬度误差分别下降了 22.69% 和 9.14%,提高了作业船的定位精度。

3.4 导航时间

对相同预置航线的水草区域,分别采用 3 种导航方法各进行 10 次重复实验。采用秒表分别计时,再计算平均时间,并记录,结果如表 3 所示。航线长度约为 62 m,每次实验作业船的运行速度基本相同。

表 2 纬度误差

Tab. 2 Latitude error (°)

目标位置	目标纬度 L	实测纬度			误差 δ_L		
		DGPS	组合导航	IPSO - UKF	DGPS	组合导航	IPSO - UKF
1	33.063 570 12	33.063 571 52	33.063 571 85	33.063 571 50	1.40×10^{-6}	1.73×10^{-6}	1.38×10^{-6}
2	33.063 584 71	33.063 589 62	33.063 589 71	33.063 590 71	4.91×10^{-6}	5.00×10^{-6}	6.00×10^{-6}
3	33.063 622 00	33.063 619 12	33.063 620 19	33.063 621 83	2.88×10^{-6}	1.81×10^{-6}	1.70×10^{-7}
4	33.063 632 51	33.063 632 95	33.063 631 05	33.063 631 54	4.40×10^{-7}	1.46×10^{-6}	9.70×10^{-7}
5	33.063 592 02	33.063 598 11	33.063 593 21	33.063 594 17	6.09×10^{-6}	1.19×10^{-6}	2.15×10^{-6}
A	33.063 595 45	33.063 589 40	33.063 588 99	33.063 589 78	6.05×10^{-6}	6.46×10^{-6}	5.67×10^{-6}
B	33.063 613 02	33.063 621 13	33.063 621 21	33.063 622 82	8.11×10^{-6}	8.19×10^{-6}	9.80×10^{-6}
C	33.063 629 24	33.063 625 30	33.063 625 91	33.063 628 30	3.94×10^{-6}	3.33×10^{-6}	9.40×10^{-7}
D	33.063 631 42	33.063 627 13	33.063 628 57	33.063 630 68	4.29×10^{-6}	2.85×10^{-6}	7.40×10^{-7}
E	33.063 616 12	33.063 606 59	33.063 607 68	33.063 607 15	9.53×10^{-6}	8.44×10^{-6}	8.97×10^{-6}
均值					4.76×10^{-6}	4.05×10^{-6}	3.68×10^{-6}

表 3 导航时间

Tab. 3 Navigation time s

序号	DGPS	组合导航	IPSO - UKF
1	68.85	68.73	65.14
2	69.34	68.90	65.38
3	68.29	67.34	64.11
4	68.81	67.59	64.72
5	68.20	67.08	65.35
6	68.37	69.51	66.30
7	68.16	69.84	64.37
8	70.76	69.75	66.45
9	69.15	69.03	67.35
10	68.13	67.10	66.17
均值	68.81	68.49	65.53

由表 3 可知,本文提出方法的导航时间比 DGPS 导航方法减少了 3.28 s,比组合导航方法减少了 2.96 s。因此,本文所提方法相比 DGPS 导航和组合导航的航行时间分别减少了 4.77% 和 4.32%,提高了作业船清理水草的工作效率。

4 结论

(1)针对蟹塘水草分布的不均匀性和 DGPS 导航的缺点,引入视觉导航,提出 ISPO - UKF 的组合导航方法。该方法相对 DGPS 导航,位置误差有所下降,提高了系统定位精度。

(2)通过仿真实验,相比 DGPS 导航方法,本方法导航结果东向和北向位置 RMS 分别下降了 46.09% 和 71.51%;相比视觉组合导航方法东向和北向位置 RMS 分别下降了 23.92% 和 58.26%。在导航实验中,相同经度的目标位置,本文提出方法相比 DGPS 导航和组合导航纬度误差分别下降了 22.69% 和 9.14%。

(3)在相同的预置航线下,测试各导航方法的航行时间,得到本文方法相比 DGPS 导航减少了 3.28 s,相比组合导航减少了 2.96 s。本文方法相比 DGPS 导航和组合导航航行时间分别减少了 4.77% 和 4.32%,作业船工作效率得到提高。

参 考 文 献

1 车斌，王倩倩. 江苏省河蟹养殖产业 SWOT 分析及对策[J]. 山西农业科学，2011，39(7)：736－739.
CHE Bin，WANG Qianqian. SWOT analysis and measures for crab aquaculture industry in Jiangsu Province[J]. Journal of Shanxi Agricultural Sciences，2011，39(7)：736－739.（in Chinese）

2 孙月平，赵德安，洪剑青，等. 河蟹养殖船载自动均匀投饵系统设计及效果试验[J]. 农业工程学报，2015，31(11)：31－39.
SUN Yueping，ZHAO Dean，HONG Jianqing，et al. Design of automatic and uniform feeding system carried by workboat and effect test for raising river crab[J]. Transactions of the CSAE，2015，31(11)：31－39.（in Chinese）

3 刘会贵，赵德安，孙月平，等. 水草全自动清理船控制系统[J/OL]. 农业机械学报，2014，45(增刊)：281－286. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag=1&file_no=2014s146&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2014.S0.046.
LIU Huigui，ZHAO Dean，SUN Yueping，et al. Control system for automatic aquatic plant cleaning ship[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery，2014，45(Supp.)：281－286.（in Chinese）

4 张丽珍，陈金稳，李俊. 水草收割机的研究现状[J]. 上海水产大学学报，2008，17(4)：486－492.
ZHANG Lizhen，CHEN Jinwen，LI Jun. A review of aquatic weed harvesters[J]. Journal of Shanghai Fisheries University，2008，17(4)：486－492.（in Chinese）

5 王永鼎，沈文蕾. 虾蟹池塘水草收割打捞工艺研究[J]. 上海海洋大学学报，2011，20(6)：938－942.
WANG Yongding，SHEN Wenlei. Harvesting process of aquatic for shrimo-crab-pond[J]. Journal of Shanghai Ocean University，2011，20(6)：938－942.（in Chinese）

6 谢国兴，陈正锦，鲍胜华，等. 河蟹生态健康养殖池塘中水草的栽培[J]. 水产养殖，2013，34(12)：45－47.

7 陈艳，张漫，马文强，等. 基于 GPS 和机器视觉的组合导航定位方法[J]. 农业工程学报，2011，27(3)：126－130.
CHEN Yan，ZHANG Man，MA Wenqiang，et al. Positioning method of integrated navigation based on GPS and machine vision[J]. Transactions of the CSAE，2011，27(3)：126－130.（in Chinese）

8 姬长英，周俊. 农业机械导航技术发展分析[J/OL]. 农业机械学报，2014，45(9)：44－54. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag=1&file_no=20140908&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2014.09.008.
JI Changying，ZHOU Jun. Current situation of navigation technologies for agricultural machinery[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery，2014，45(9)：44－54.（in Chinese）

9 沈明霞，姬长英. 农业机器人视觉导航技术发展与展望[J]. 农业机械学报，2001，32(1)：109－117.
SHEN Mingxia，JI Changying. Development and prospect of vision guidance of agricultural robot[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery，2001，32(1)：109－117.（in Chinese）

10 SEO D，LEE H，JUNG J，et al. Dual-band antenna using a C-shaped dual-feed for GPS/WLAN applications[J]. Microwave and Optical Technology Letters，2016，58(5)：1207－1211.

11 BOADA B L，BOADA M J L，DIAZ V. Vehicle sideslip angle measurement based on sensor data fusion using an integrated ANFIS and an unscented Kalman filter algorithm[J]. Mechanical Systems and Signal Processing，2016，72－73：832－845.

12 PANDIT M，CHAUDHARY V，DUBEY H M，et al. Multi-period wind integrated optimal dispatch using series PSO－DE with time-varying Gaussian membership function based fuzzy selection[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems，2015，73：259－272.

13 COUCEIRO M，SIVASUNDARAM S. Novel fractional order particle swarm optimization[J]. Applied Mathematics and Computation，2016，283：36－54.

14 胥小波，郑康锋，李丹，等. 新的混沌粒子群优化算法[J]. 通信学报，2012，33(1)：24－30.
XU Xiaobo，ZHENG Kangfeng，LI Dan，et al. New chaos-particle swarm optimization algorithm[J]. Journal on Communications，2012，33(1)：24－30.（in Chinese）

15 李安强，王丽萍，蔺伟民，等. 免疫粒子群算法在梯级电站短期优化调度中的应用[J]. 水利学报，2008，39(4)：426－432.
LI Anqiang，WANG Liping，LIN Weimin，et al. Application of immune particle swarm optimization algorithm to short-term optimal dispatch of cascade hydropower stations[J]. Journal of Hydraulic Engineering，2008，39(4)：426－432.（in Chinese）

16 YU Z，CUI P，NI M. A polynomial chaos based square-root Kalman filter for Mars entry navigation[J]. Aerospace Science and Technology，2016，51：192－202.

17 张庆波，傅忠谦，杨可. 基于无迹卡尔曼滤波的粒子群算法研究[J]. 中国科学技术大学学报，2013，43(10)：850－855.
ZHANG Qingbo，FU Zhongqian，YANG Ke. Particle swarm optimization based on unscented Kalman filter[J]. Journal of University of Science and Technology of China，2013，43(10)：850－855.（in Chinese）

18 ZHAO F，LIU Y，ZHANG C，et al. A self-adaptive harmony PSO search algorithm and its performance analysis[J]. Expert Systems with Applications，2015，42(21)：7436－7455.

19 BORSHEVSKY M，MICHALEWICZ Z. Stability analysis of the particle swarm optimization without stagnation assumption[J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation，2016，20(5)：814－819.

20 聂茹，岳建华，邓帅奇. 地震波阻抗反演的免疫粒子群算法[J]. 中国矿业大学学报，2010，39(5)：733－739.
NIE Ru，YUE Jianhua，DENG Shuaiqi. Immune particle swarm optimization for seismic wave impedance inversion[J]. Journal of China University of Mining & Technology，2010，39(5)：733－739.（in Chinese）

21 SHANKAR T，SHANMUGAVEL S，RAJESH A. Hybrid HSA and PSO algorithm for energy efficient cluster head selection in wireless sensor networks[J]. Swarm & Evolutionary Computation，2016，30：1－10.

22 刘旭，张其善，杨东凯. 一种用于 GPS/DR 组合定位的非线性滤波算法[J]. 北京航空航天大学学报，2007，33(2)：184－187.
LIU Xu，ZHANG Qishan，YANG Dongkai. Nonlinear filter algorithm for GPS/DR integrated positioning[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics，2007，33(2)：184－187.（in Chinese）

23 ALLOTTA B，CAITI A，COSTANZI R，et al. A new AUV navigation system exploiting unscented Kalman filter[J]. Ocean Engineering，2016，113：121－132.

24 刘江，王玉金，段建雷，等. 基于高斯分布的多层无迹卡尔曼滤波算法[J]. 控制与决策，2016，31(4)：609－615.

25 HATSOPOULOS N G，WARREN W H. Visual navigation with a neural network[J]. Neural Networks，1991，4(3)：303－317.

26 CHEN Y，PARK S K，MA Y，et al. A new automatic parameter setting method of a simplified PCNN for image segmentation[J]. IEEE Transactions on Neural Networks，2011，22(6)：880－892.