

本文网址: <http://www.ship-research.com/cn/article/doi/10.19693/j.issn.1673-3185.03230>

期刊网址: www.ship-research.com

引用格式: 何红坤, 王宁, 张富宇, 等. 水面无人艇单目视觉伺服自主控制研究综述 [J]. 中国舰船研究, 2024, 19(1): 15–28.
HE H K, WANG N, ZHANG F Y, et al. Review of research on monocular visual servo-based autonomous control of unmanned surface vehicles [J]. Chinese Journal of Ship Research, 2024, 19(1): 15–28 (in Chinese).

水面无人艇单目视觉伺服自主控制 研究综述



扫码阅读全文

何红坤^{1,3}, 王宁^{*2}, 张富宇², 韩冰⁴

1 大连海事大学 船舶电气工程学院, 辽宁 大连 116026

2 大连海事大学 轮机工程学院, 辽宁 大连 116026

3 江苏海洋大学 海洋工程学院, 江苏 连云港 222005

4 上海船舶运输科学研究所, 上海 200135

摘要: 单目视觉伺服采用相机模仿人眼视觉功能, 感知周围环境和测量运动状态, 是提高无人艇航行感知与控制自主性的重要手段。首先, 从基本原理出发, 简述视觉伺服技术分类、相机透视投影原理和无人艇运动数学模型, 为文献综述分析提供框架基础。然后, 根据任务复杂度, 依次综述单目视觉伺服在无人艇航向控制、镇定控制、轨迹跟踪控制和集群控制等典型应用场景下的研究进展和挑战。最后, 系统性地总结无人艇单目视觉伺服自主控制的潜在研究方向和发展趋势。

关键词: 无人艇; 单目视觉伺服; 航向控制; 镇定控制; 轨迹跟踪控制; 集群控制

中图分类号: U664.82

文献标志码: A

DOI: 10.19693/j.issn.1673-3185.03230

Review of research on monocular visual servo-based autonomous control of unmanned surface vehicles

HE Hongkun^{1,3}, WANG Ning^{*2}, ZHANG Fuyun², HAN Bing⁴

1 College of Marine Electrical Engineering, Dalian Maritime University, Dalian 116026, China

2 College of Marine Engineering, Dalian Maritime University, Dalian 116026, China

3 School of Ocean Engineering, Jiangsu Ocean University, Lianyungang 222005, China

4 Shanghai Institute of Ship Transportation Science, Shanghai 200135, China

Abstract: The monocular camera can both perceive the surroundings and measure the motion states of an unmanned surface vehicle (USV) by imitating the functions of human vision, such that the monocular visual servo is an important means of improving the navigation perception and control autonomy of USVs. Starting from basic principles, the classification of visual servo methods, perspective projection model of the camera and mathematical model of the USV are briefly described so as to provide a fundamental framework for the literature review. According to task complexity, the research progress and challenges of monocular visual servo-based USV control are then summarized in four typical scenarios, namely course control, stabilization control, trajectory tracking control and swarm control. Finally, the future trends of the monocular visual servo-based autonomous control of USVs are systematically summarized.

Key words: unmanned surface vehicle (USV); monocular visual servo; course control; stabilization control; trajectory tracking control; swarm control

0 引言

海洋是全球气候变化的引擎、生物矿产资源

的宝库、水上交通运输的命脉、国家安全防护的要地。关心海洋、认识海洋和经略海洋离不开海洋装备。作为集成多种高科技的海洋机器人, 水

收稿日期: 2022-12-26 修回日期: 2023-05-02 网络首发时间: 2023-07-20 10:49

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (52271306); 船舶总体性能创新研究开放基金资助项目 (31422120); 辽宁省中央引导地方科技发展专项资金资助 (2023JH6/100100010)

作者简介: 何红坤, 男, 1988 年生, 博士, 讲师。研究方向: 无人船艇视觉伺服运动控制。E-mail: hehongkun4@163.com

王宁, 男, 1983 年生, 博士, 教授, 博士生导师。研究方向: 自主海洋机器人。E-mail: n.wang@ieee.org

张富宇, 男, 1999 年生, 硕士生。研究方向: 无人船艇视觉伺服控制。E-mail: 13934850753@163.com

*通信作者: 王宁

面无人艇(以下简称“无人艇”)具有隐蔽性好、机动性强、活动范围广等优点^[1-4],可以替代人类完成重复和危险的作业任务,已广泛应用于水文信息采集、海洋气象观测、渔业资源调查、海底地貌测绘、海事巡逻执法、海上灾害救援、海岛安全巡护、军事隐蔽侦察等领域^[5-7]。

目前,无人艇多采用全球定位系统(GPS)确定自身位置,实现自主运动控制,包括镇定控制^[8]、航向控制^[9]、航路点跟踪控制^[10]、路径跟随控制^[11]、轨迹跟踪控制^[12]、集群编队控制^[13]等任务。然而,GPS需要接收外源星基信号,在桥梁和河道等遮挡水域面临信号丢失和衰减问题,并且定位精度只有米量级^[14]。其他定位方式,如惯性测量单元(IMU)采用积分方式计算无人艇位置,定位误差会随时间的累积不断增大^[15];激光雷达通过扫描无人艇周围环境实现相对定位,但传感设备成本较高^[16]。与之相比,相机价格低廉、携带轻便、采集的图像信息丰富,具有极强的环境交互能力和较高的定位精度^[17]。显然,赋予无人艇人眼视觉功能不仅能够增强其航行态势感知的智能性,而且能够提高其在GPS拒止环境下的运动自主性^[18]。在人工智能快速发展的推动下,基于视觉伺服的运动控制已成为提高无人艇运动自主性的研究热点之一。

机器人视觉伺服涉及图像处理、计算机视觉和控制理论等学科。实际上,具有视觉功能的机器人最早出现于20世纪60年代,其视觉系统通过图像处理和位姿解算向机器人提供一次控制信息,但囿于当时计算机运算能力的限制,该系统不再参与整个控制过程,机器人处于开环控制状态^[19]。1973年,Shirai和Inoue^[20]采用相机直接测量目标物的位置误差,通过误差反馈形成控制闭环,提高机器人装配任务的控制精度,由此首次提出“视觉反馈”的概念。随着技术发展,图像处理能力得到很大提升,视觉系统能够在较短时间内生成反馈信号。为了强调整个控制闭环的运算实时性,Hill和Park于1979年首次提出“视觉伺服”的概念^[21]。由于“视觉反馈”只注重从图像信息里提取反馈信号,而“视觉伺服”概念包含了从图像采集到运动控制的全部实时过程,因而被广泛采用^[22]。20世纪80年代以后,计算机运算能力不断增强,数字相机快速发展,市场上还出现了专门处理图像的硬件设备。在此背景下,机器人视觉伺服在理论研究和实际应用方面均得到蓬勃发展^[23]。早期机器人视觉伺服主要应用于工业机器人目标定位、抓取、跟踪等任务^[24],后来扩展至移动机器人运动控制,如无人机^[25]、无人车^[26]、水

下机器人^[27]等。

早在1996年,Hutchinson等^[28]撰写了工业机器人视觉伺服控制教程,旨在介绍视觉伺服控制的基本概念框架。Chaumette等^[29]首先详细综述了工业机器人视觉伺服的基本控制方法,然后又报道了先进视觉伺服概念和一系列最新控制方法^[30]。Staniak等^[31]总结性地对伺服控制框架进行分类,分析讨论了相机标定误差对工业机器人控制性能的影响。Azizian等^[32-33]分别从直接视觉图像和层析图像两个角度阐释了视觉伺服在医疗机器人领域的研究现状,总结了当前面临的主要挑战和未来潜在应用价值。林靖等^[19]从系统结构、图像处理和控制在方法3个方面介绍了机器人视觉伺服控制研究现状。赵清杰等^[23]讨论了视觉伺服中图像特征选择的问题,介绍了人工神经网络在视觉伺服中的应用情况。王麟琨等^[34]针对机器人视觉伺服面临的主要问题,详细阐述了相应的解决方案。薛定宇等^[35]重点介绍了两类机器人视觉伺服控制方法,详细分析了视觉伺服系统的动态过程。倪受东等^[36]回顾了机器人视觉伺服的发展历程,详细阐述了智能算法在机器人视觉伺服控制中的应用。方勇纯^[17]针对视觉伺服的主要研究方向和问题,介绍了机器人位姿提取、系统不确定性、图像空间路径规划、智能视觉伺服等内容。贾丙西等^[37]从视觉系统、控制方法和实现策略等方面对机器人视觉伺服进行综述,重点介绍了系统动态性能、噪声处理、模型不确定性和约束控制等内容。徐德^[38]对单目视觉伺服的运动映射关系、误差表征和控制律设计等方面进行综述,给出了单目视觉伺服在不同领域的典型应用。杨月全等^[39]针对无标定视觉伺服,详细分析了雅克比在线估计、雅克比自适应估计和深度独立雅克比估计等方法。Wu等^[40]综述了基于学习的机器人视觉伺服策略,尤其是模型预测控制方法,并对基于神经网络和强化学习的算法进行了讨论。Huang等^[41]以无人车视觉伺服控制为主题,从自抗扰控制视角综述了两种视觉伺服系统的建模与不确定性处理方法。

以上文献从不同角度综述了视觉伺服在机器人控制领域的研究现状,为开展无人艇视觉伺服控制研究提供了重要借鉴。然而,这些文献多关注于室内六自由度工业机器人视觉伺服控制问题,而专门介绍无人艇视觉伺服自主控制的综述文献还鲜有报道。由于无人艇海上生存能力有限,往往只能在较低海况下正常工作,因此,无人艇的垂荡、俯仰和横摇运动幅值一般较小,可忽略不计,而控制器设计往往只考虑纵荡、横荡和

船摇 3 个自由度的运动行为。此外,无人艇在水面航行时难免会受到水和空气两种不同介质的综合影响,其运动动态表现出高度的非线性、复杂性、不确定性和强耦合等特征。这些因素都为基于视觉伺服的无人艇运动控制带来了新的实际困难和理论挑战。幸运的是,相比于陆上拥挤复杂的交通环境,无人艇的海上工作场景结构相对简单,十分有利于机器视觉对周围环境的认知与理解。虽然视觉伺服在无人艇自主控制领域尚处于初始应用阶段,但近年来涌现出了许多研究成果,所以很有必要有针对性地对目前研究现状和面临的挑战进行综述,共同推动无人艇视觉伺服自主控制在理论和实践这两个方面的快速发展。

目前,在无人艇上最常采用的是单目相机来作为视觉传感器,因此本文将主要综述单目视觉伺服方法在无人艇自主控制领域的应用。首先,从基本原理出发,简述视觉伺服方法的分类、相机透视投影模型和无人艇的运动数学模型,以便于文献讨论和分析。然后,根据任务复杂度,依次梳理单目视觉伺服在无人艇的航向控制、镇定控制、轨迹跟踪控制和集群控制场景下的研究现状及其所面临的独特挑战。最后,对无人艇的单目视觉伺服自主控制研究方向和发展趋势进行总结 and 展望。

1 基本原理

1.1 视觉伺服方法分类

如表 1 所示,根据不同标准,无人艇视觉伺服方法可分为不同类型。按照相机数量,视觉伺服可分为单目视觉伺服、双目视觉伺服和多目视觉伺服^[39]。虽然双目视觉伺服和多目视觉伺服具有更广的视野,但是其需要处理更多的图像,使用费用和维护成本也更高。相比之下,单目视觉伺服处理较少的图像,更能满足伺服过程对运算实时性的要求^[38]。因此,无人艇视觉伺服系统多采用单目相机作为感知和测量单元。

表 1 视觉伺服方法分类		
Table 1 Classification of visual servo methods		
分类标准	类型名称	主要特点
相机数量	双/多目视觉伺服	相机视野广、使用和维护成高
	单目视觉伺服	处理图像少、满足计算实时性
相机位置	固定相机系统	定位精度高、使用场景受限
	手眼系统	灵活性强、运动范围广
误差类型	基于图像的视觉伺服	局部稳定、对标定误差 insensitive
	基于位置的视觉伺服	全局稳定、依赖标定精度

按照相机的安装位置,视觉伺服可分为固定相机系统(eye to hand)和手眼系统(eye in hand)。为了开展无人艇动力定位控制算法研究,Sørensen^[42]和 Wang 等^[43]将多个相机安装在实验水池的墙壁上,利用固定相机系统实现了无人艇高精度视觉定位。Hu 等^[44]同样采用该系统定位无人艇位置,用于验证多无人艇运动目标环绕包围控制算法的有效性。需要强调的是,固定相机系统将视觉传感器安装在工作环境中,使得无人艇只能在有限的可视空间范围内运动。与其不同的是,手眼系统将相机安装在无人艇上,并随无人艇一起运动。该系统更像为机器人安装了“眼睛”,可使无人艇的运动范围更广。由于手眼系统具有显著的灵活性,在无人艇单目视觉伺服自主控制中也更为常见,因此本文着重综述这类视觉伺服形式。

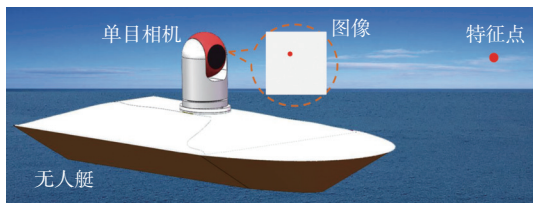
按照误差类型,视觉伺服分为两类:一是基于图像的视觉伺服(image-based visual servo, IBVS)^[29],二是基于位置的视觉伺服(position-based visual servo, PBVS)^[30]。IBVS 直接在线比较当前图像和期望图像,在图像空间通过误差反馈形成伺服控制闭环。相反,PBVS 利用当前图像和相机标定参数提取位置或姿态信息,在欧几里得空间与期望信号构造伺服误差,形成无人艇运动控制闭环。IBVS 和 PBVS 各有优缺点,应根据具体任务场景选择合适的视觉伺服方式。此外,二者是从控制的角度对视觉伺服方法进行的分类,因此本文也以此为主线综述无人艇单目视觉伺服自主控制的研究现状。

1.2 相机透视投影原理

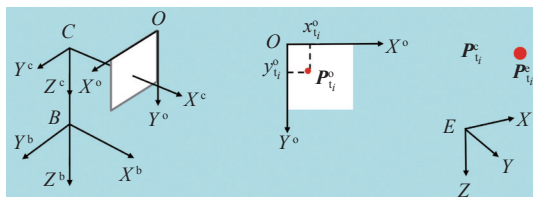
根据手眼系统配置,如图 1(a)所示,无人艇上安装 1 个单目相机,用来感知周围环境和测量运动状态等。为了便于空间关系描述,如图 1(b)所示,按照右手定则分别建立地球坐标系 $E-XYZ$ 、相机坐标系 $C-X^cY^cZ^c$ 和无人艇附体坐标系 $B-X^bY^bZ^b$,其中 $E-XYZ$ 为东北下坐标系,原点 E 固定在地球表面上; $C-X^cY^cZ^c$ 建立在相机光心 C 上, X^c 轴为相机光轴; $B-X^bY^bZ^b$ 附着在无人艇上, X^b 轴和 Y^b 轴分别指向艇首和右舷。此外, $O-X^oY^o$ 为图像坐标系,原点 O 位于图像的左上角, X^o 轴水平向右, Y^o 轴垂直向下。

选择 $p_i^c = [x_i^c, y_i^c, z_i^c]^T$ 表示第 i 个特征点在 $C-X^cY^cZ^c$ 的三维坐标,单位为 $[m, m, m]^T$;选择 $p_i^o = [x_i^o, y_i^o, 1]^T$,表示其投影点在 $O-X^oY^o$ 的齐次坐标(单位:像素)。根据相机透视投影原理^[38],有

$$p_i^o = \frac{1}{x_i^c} T_c p_i^c \tag{1}$$



(a) 无人艇、单目相机、图像和特征点



(b) 地球、附体、相机和图像坐标系

图 1 相机透视投影模型

Fig. 1 The perspective projection model of monocular camera

其中,

$$T_c = \begin{bmatrix} x_c^o & a_x & 0 \\ y_c^o & 0 & a_y \\ 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

式中, T_c 为相机内部参数矩阵, 其中, (x_c^o, y_c^o) 表示图像主点, a_x 和 a_y 为相对焦距长度。

根据坐标变换关系, 如图 1 (b) 所示, p_i^c 还可表示为

$$p_i^c = T_c p_i^o \quad (2)$$

其中,

$$p_i^c = [x_i^c, y_i^c, z_i^c, 1]^T, T_c = \begin{bmatrix} R_c^c & t_c^c \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$$

式中: p_i^c 为特征点在 $E-XYZ$ 坐标系中的齐次坐标; T_c 为相机外部参数矩阵, 其中 $R_c^c \in \mathbf{R}^{3 \times 3}$ 和 $t_c^c \in \mathbf{R}^3$ 分别为 $C-X^c Y^c Z^c$ 到 $E-XYZ$ 坐标系中的旋转矩阵和平移向量。

需说明的是, 采用 SIFT^[45], SURF^[46] 或 BRISK^[47] 等目标识别算法可以得到 p_i^c ; 利用 Tsai 两步法^[48]、圆环点法^[49] 或张正友平面法^[50] 等可以在实验室标定出 T_c ; 通过姿态传感器可以测量 R_c^c 中旋转角度变量; 采用预先标定方式可以获知 t_c^c 中部分平移参数。结合式(1)和式(2)可知: 单目相机成像是一个复杂的非线性映射过程, 若缺乏必要的约束条件, 其难以实现视觉定位 (即得到 p_i^c 或 p_i^o 信息), 也是其所面临的固有问题。

1.3 无人艇运动数学模型

无人艇航行在水面上其三自由度的运动学模型可描述为

$$\dot{\eta} = R(\psi)v \quad (3)$$

其中,

$$R(\psi) = \begin{bmatrix} \cos \psi & -\sin \psi & 0 \\ \sin \psi & \cos \psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$\eta = [x, y, \psi]^T, v = [u, v, r]^T$$

式中: η 为位姿向量, 包括 $E-XY$ 坐标系中的位置 (x, y) 和艏摇角 ψ , 单位为 $[m, m, \text{rad}]^T$; v 为速度向量, 包括 $B-X^b Y^b$ 坐标系中的线速度 (u, v) 和角速率 r , 单位为 $[m/s, m/s, \text{rad/s}]^T$; $R(\psi)$ 为 $E-XY$ 到 $B-X^b Y^b$ 的旋转矩阵。

无人艇是二阶非线性系统, 根据牛顿-拉格朗日模型框架, 其动力学方程表示为^[51]

$$M\dot{v} = -C(v)v - D(v)v + \tau_\delta + \tau \quad (4)$$

式中: $M \in \mathbf{R}^{3 \times 3}$, 为惯性质量矩阵, 包括水动力引起的附加质量; $C(v) \in \mathbf{R}^{3 \times 3}$ 和 $D(v) \in \mathbf{R}^{3 \times 3}$ 分别为科里奥利向心矩阵和水动力阻尼矩阵; $\tau \in \mathbf{R}^3$ 和 $\tau_\delta \in \mathbf{R}^3$ 分别为控制输入向量和系统扰动向量, 二者单位均为 $[N, N, N \cdot m]^T$ 。假设原点 B 位于无人艇的旋转中心, 通过半经验方式、软件包和物理实验等方法可辨识到 M 和 $C(v)$ 中的模型参数^[52], 但 $D(v)$ 中的参数很难或不可能精确辨识^[53]。另外, τ_δ 包含了未建模内部动态和风、浪、流所引起的外部扰动。因此, 其变化动态很难通过数学模型精确地表述出来。

2 研究进展与挑战

在不同的任务场景下, 无人艇单目视觉伺服将面临不同的自主控制问题。按照任务复杂度, 本文将依次详述单目视觉伺服在无人艇航向控制、镇定控制、轨迹跟踪控制和集群控制任务场景下的研究现状及面临的挑战。

2.1 单目视觉伺服航向控制

无人艇单目视觉伺服航向控制是根据艇载单目视觉系统所采集的图像信息设计控制输入, 实现无人艇航行方向控制。

如图 2 所示, 在无人艇接近水上桥梁时, GPS 会出现信号丢失问题, 这将严重威胁无人艇航行安全。Zhao 等^[54-55] 采用单目相机感知无人艇前方航行环境, 利用图像处理和阈值分割方法将桥洞轮廓从图像中分离出来, 根据桥洞投影中心和图像中心计算无人艇航向偏差角度, 根据桥洞轮廓和图像边缘计算无人艇航向偏差距离, 以及结合以上两个测量变量和艏摇角速率, 设计了无人艇单目视觉伺服比例微分控制器, 然后通过调节艇

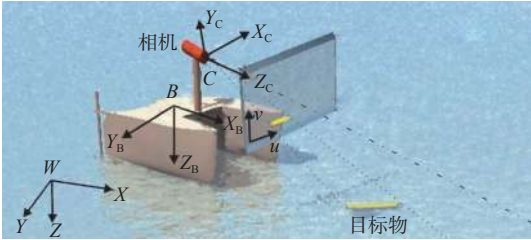
尾两个螺旋桨的电压差来改变无人艇的航向, 使无人艇能够安全地穿越桥梁。在室内比赛场地, GPS 无法测量无人艇航行赛道位置。Ekelmann 等^[56]采用红色和绿色浮桩作为航道标志物, 便于无人艇的艇载视觉系统识别; 在无人艇附体坐标系下, 计算航道偏离角度和距离, 并据此设计比例控制器, 用于合成推进器控制电压指令, 分别调节无人艇航行方向和速度, 使无人艇顺利通过预设航道。



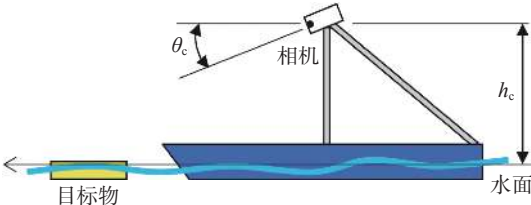
图 2 基于单目视觉的无人艇穿越桥梁任务^[54]
Fig. 2 The brigde crossing task of USV based on monocular visual servo^[54]

由于视觉在近距离具有高精度定位优势, 无人艇单目视觉伺服航向控制广泛应用于移动目标对接任务。徐海彬等^[57]将高清单目相机安装在无人艇上, 采用视觉检测网络识别悬浮托架开口, 根据其图像投影坐标计算无人艇相对于托架中心的偏转角度, 并利用偏转角度及其微分信号设计 S 面控制器, 将合成的舵角指令发送到无人艇的底层控制系统, 以及在油门恒定的条件下, 通过控制舵机和推进器改变无人艇运动方向, 实现无人艇自主回收。如图 3 (a) 所示, Martins 等^[58]假设黄色潜航器漂浮于水上, 且只有小部分体积露出水面, 便于艇载单目相机精确测量该潜航器的相对位置和姿态, 并根据无人艇和潜航器对接任务所处的运动阶段, 设计了混合控制操纵方案, 按照事件触发条件, 在不同控制模态下调节艇尾螺旋桨的转速差, 控制无人艇的纵荡速度和艏摇角度。针对该对接问题, 如图 3 (b) 所示, Dunbabin 等^[59]同样采用艇载单目相机测量水面目标物的相对位置, 然后根据视觉测量距离计算目标物对无人艇产生的虚拟吸引力和排斥力, 将二者的合力方向作为无人艇的期望艏摇角, 并利用艏摇角偏差设计比例控制器, 通过调节两个螺旋桨的推力差来改变无人艇的航行姿态, 直至实现无人艇与水面目标物的对接。

值得注意的是, 以上视觉伺服策略以单目相机为导引装置, 通过计算无人艇姿态和位置偏差, 获得无人艇航向控制反馈信号。由于没有直接利用图像定义误差, 因此上述策略均属于 PBVS



(a) 无人艇与潜航器的对接任务^[58]



(b) 无人艇与水面目标物的对接任务^[59]

图 3 基于单目视觉的无人艇对接任务

Fig. 3 The USV docking task based on monocular visual servo

方法。然而, 如式(1)所示, 这类方法需要预先标定相机内部参数, 如 (x_c^0, y_c^0) 和 (a_x, a_y) 等, 才能计算出无人艇航向偏差信息^[54-57]。由式(1)和式(2)可以看出: 在单目视觉相对定位时, 由于缺乏图像深度信息 x_c^0 , PBVS 需要标定相机外部参数作为额外约束条件, 如 Martins 等^[58]要求已知单目相机距离水面的高度、Dunbabin 等^[59]要求标定相机高度和俯仰角度。可见, PBVS 方法依赖于相机标定精度, 而标定误差会不可避免地引入到无人艇单目视觉伺服航向控制系统中。因此, 定量分析标定误差对控制性能的影响及消除这些不利影响是这类方法所面临的主要挑战。另外, 如式(4)所示, 无人艇系统具有非线性、强耦合和高度不确定等特性, 如何调节控制参数使无人艇单目视觉伺服航向控制系统稳定同样是不小的挑战。除了 PBVS 外, IBVS 也应用在无人艇单目视觉伺服航向控制中。Kim 等^[60]采用当前图像和期望图像直接定义无人艇对接任务误差, 以增强控制算法对相机模型误差的鲁棒性, 首先利用伪逆技术设计了比例控制器, 在运动学上实现无人艇航向控制, 然后考虑无人艇动力学系统存在的复杂扰动, 采用强化学习方法设计了无模型的视觉伺服策略, 研究表明, 该方法是抵抗干扰的有效途径。由于 IBVS 在图像空间构造伺服误差, 容易导致无人艇在欧几里得空间产生不合逻辑的运动行为, 且存在局部收敛和控制奇异等问题, 因此 IBVS 在无人艇运动控制中较少应用。

2.2 单目视觉伺服镇定控制

无人艇单目视觉伺服镇定控制是利用艇载单目相机所拍摄的图像信息, 将无人艇由当前位姿

镇定到恒定的期望位姿。

在无人艇单目视觉伺服镇定控制中,自主靠泊是典型的应用场景。如图 4 所示,张山甲等^[61]将红色矩形面作为泊位标志物,采用艇载单目相机感知泊位周围环境;首先,利用标定的相机内部参数计算无人艇的艏向偏差角;然后,根据已知的标志物高度重构无人艇三维工作场景,并将矩形面的垂线作为虚拟航线,计算无人艇的偏航距离;最后,将以上两个测量变量作为反馈误差,设计了基于 PBVS 的比例微分控制器,通过调节两个推进电机的电压差,使无人艇沿着叠标线靠近泊位。因为该无人艇操纵能力受限,具有欠驱动属性,所以当标志物的实际与期望投影面积差值小于设定阈值时,即认为靠泊任务完成,无人艇停止控制输入。



图 4 基于单目视觉的无人艇靠泊任务^[61]

Fig. 4 The USV berthing task based on monocular visual servo^[61]

由于 PBVS 方法需要繁琐地标定相机外部参数,这给实际工程应用带来一定困难。Wang 和 He^[62]以平面上的特征点作为视觉目标,利用单应性分解技术从当前图像和期望图像中直接重构无人艇伺服镇定误差,避免了相机外部参数标定,方便了实际应用;结合无人艇运动学模型(式(3))和动力学模型(式(4)),建立了基于单应性视觉伺服(homography-based visual servo, HBVS)镇定控制系统。值得强调的是,利用二维图像进行三维重建是欠约束的病态问题,因此 HBVS 方法恢复出来的伺服误差与无人艇实际位姿误差之间存在着未知的尺度因子。幸运的是,该尺度因子与期望图像的深度有关,因此, Wang 和 He^[62]采用在线估计的方式,提出了基于参数自适应的无人艇单目视觉伺服镇定控制器,在无人艇模型参数已知和系统扰动可忽略的条件下,实现了无人艇单目视觉伺服镇定系统渐近稳定。本质上,HBVS 以具有尺度因子的位姿误差作为反馈信号,属于 PBVS 的特殊形式。由于图像信号独立于控制闭环之外,HBVS 与典型的 PBVS 一样,存在视觉目标丢失问题。尤其是当无人艇靠近视觉目标时,当前图像接近于期望图像,如式(1)所示,图像深度 x_t^z 逐渐减小,投影点的变化对无人艇的运动将

变得更为敏感,相机的视野问题也变得更为突出,故要求无人艇镇定控制应有较高的稳态精度。然而,在 HBVS 系统中,未知的图像深度必然出现在运动学子系统中,表现为非匹配的视觉不确定性。另外,海洋环境扰动建模和无人艇动力学模型参数辨识并非易事,不确定性同样存在于无人艇的动力学子系统中。在匹配和非匹配不确定性的综合作用下,无人艇的镇定控制品质难以保证,如何提高系统的抗干扰能力是无人艇 HBVS 镇定控制所面临的巨大挑战。

Wang 和 He^[63]采用反步法将无人艇 HBVS 系统中的匹配和非匹配不确定性归结为集总未知项,提出双通道极速学习机制,将单隐层前馈神经的输入层和输出层直接连接起来,加快了该未知项的辨识速率和精度,在内部动态和外部扰动均未知的情况下,使得无人艇镇定误差收敛到原点的任意小邻域内。Wang 和 He^[64]研究了无人艇运动速度未知问题,根据 HBVS 恢复的位姿误差设计了有限时间速度观测器,可快速精准地观测无人艇速度状态,而集总不确定性由模糊逻辑系统在线辨识,最大限度地减少了视觉目标脱离相机视野的风险。何红坤和王宁^[65]假设外部扰动可忽略不计且视觉目标始终位于广角相机视野之中,来研究欠驱动无人艇的镇定控制问题,提出了连续时变的输出反馈控制器,其在图像深度、无人艇速度和模型参数均未知的前提下可使欠驱动无人艇 HBVS 系统渐近稳定。He 和 Wang^[66]专门研究了 HBVS 系统的视野受限问题,在无人艇部分模型参数已知的条件下,提出了基于预设性能的无人艇单目视觉伺服镇定控制器,严格地将镇定误差约束在可见性范围内。遗憾的是,在预设性能函数设计时,由于图像空间的相机视野受限问题很难等价地映射到欧几里得空间,因此该方法的可见性约束条件将变得更加保守。

2.3 单目视觉伺服轨迹跟踪控制

无人艇单目视觉伺服轨迹跟踪控制是根据艇载单目相机所反馈的图像信息,通过自动调整位置和姿态使无人艇跟踪上时变期望轨迹。

需要指出的是,IBVS 根据预先人工拍摄的图像序列来定义期望轨迹,需要消耗大量的存储空间。相反, PBVS 根据平面地图在欧几里得空间规划期望轨迹,与抽象的图像空间并无关联,对于工程实践而言更加直观。如前所述, PBVS 需要精确地标定相机外部参数,将视觉定位问题转化为经典的 PnP 问题^[67]。但其最大的挑战是该参数一旦标定后,不会自动修正,那么标定误差会

引入到控制系统中,降低轨迹跟踪精度。为了解决该问题,如图 5 所示, Wang 等^[68]假设无人艇动力学模型(式(4))中 τ_s 可忽略不计,其他模型参数均已精确辨识,并根据文献[69]的轨迹跟踪控制器形式,提出了基于单目视觉的自适应位置估计器,以避免相机外部参数标定。该方法的工作原理是:首先,根据相机的成像原理(式(1)和式(2))以及无人艇的估计位置生成预测图像;然后,依据预测图像和实际图像巧妙构造差异变量,使该变量与无人艇的位置估计值相关,这需要一定的设计技巧;最后,利用李雅普诺夫理论设计自适应律,在该差异变量驱动下更新无人艇估计位置,使位置估计误差渐近稳定。



图 5 基于单目视觉的无人艇轨迹跟踪任务^[68]
Fig. 5 The USV trajectory tracking task based on monocular visual servo^[68]

自适应位置估计器最早出现在文献[70]和文献[71]中,通过融合视觉、姿态和速度等多源数据,实现室内移动机器人轨迹跟踪控制。假设跟随者可以获得领航者的速度信息,自适应位置估计器还被扩展到机器人编队控制中,用于跟随者估计领航者的相对位置^[72]。由于不依赖外源星基信号,同时不需要预先标定相机外部参数,因此自适应位置估计器具有较好的环境适应性,有益于提高无人艇的运动自主性。值得强调的是,自适应位置估计器的直接设计目标是缩小预测图像和实际图像之间的差异,只能使视觉定位误差渐近稳定^[73]。然而,在基于 GPS 的无人艇轨迹跟踪控制中,有限时间控制方法^[74-76]已广泛报道。为了实现更高精度的无人艇单目视觉伺服轨迹跟踪控制,自适应位置估计器在定位精度和定位速率方面还有待提高。另外,为了实现闭环控制, PBVS 和 IBVS 均要求视觉目标始终保持在相机视野之中,例如 Wang 等^[68]要求无人艇的工作环境中存在足够多的静态视觉目标。然而,海上客观条件未必能够满足该假设,这也限制了自适应位置估计器的应用场景。因此,无人艇单目视觉伺服轨迹跟踪控制面临的另一挑战是解决相机的视野问题。

在机器人视觉伺服控制中,可用多种方式解

决相机视野问题。基于优化的运动规划方法^[77-79]根据相机的可见性约束条件,预先在图像空间或欧几里得空间规划出一条可行的路径或轨迹,从而引导机器人到达期望位姿,降低视觉目标丢失风险。解决相机视野问题的另一种方法是混合控制方法^[80-82],其原理是预先设计出多种控制方案,当视觉目标接近图像边界时,控制方式由工作模式切换到应急模式,从而优先保证视觉目标的可见性。若控制任务属于 IBVS 系统,预设性能控制^[83-85]利用变换函数的有限逃逸属性,能够严格保证图像误差在相机视野内演化,是解决相机视野问题更为普遍的方法。需要强调的是,上述方法要求相机和机器人之间保持固定的位姿关系。然而,这种固定配置要求机器人始终面向视觉目标,这使机器人只能在与相机有限视野相兼容的小区域内工作。

相比之下,主动视觉^[86-90]采用云台相机专门跟踪视觉目标,使机器人在更大工作空间里完成预定的控制任务,为解决无人艇单目视觉轨迹跟踪控制的相机视野问题提供了重要借鉴。Fang 等^[86]和 Chen 等^[87]仅利用云台相机在左右之间运动的自由度,在图像水平方向上跟踪视觉目标。Wai 等^[88]仅利用云台相机的上下运动自由度,在图像垂直方向上跟踪移动物体。当然,视觉目标在水平或垂直方向均有可能离开图像平面。若同时利用云台相机的左右和上下运动自由度跟踪视觉目标,那么目标跟踪系统将变得相当复杂,即时变雅可比矩阵具有潜在奇异、不同通道间存在运动耦合、未知图像深度引起系统不确定性等。Freda 等^[89]假设目标跟踪误差动态只与云台相机的左右和上下旋转角有关,通过简化该跟踪系统,为云台相机设计了比例控制器。在不做任何简化的情况下, Ma 等^[90]采用参数自适应方法在线估计图像深度,提出了自适应比例控制器,并额外地设计了比例控制器和切换控制规则,利用混合控制方法避免控制奇异。值得注意的是,以上文献只关注了目标跟踪误差的稳态性能,而最大超调量可能会违反视野可见性约束,将不可避免地导致视觉伺服失败。在此背景下,相机的视野问题还没有完全解决。

2.4 单目视觉伺服集群控制

无人艇单目视觉伺服集群控制是指多艘无人艇以艇载单目相机为感知与测量传感器,按照一定的交互规则协作地完成预设任务,最终涌现出群体的智能行为。

与单艇相比,多无人艇可在更大范围内、以

更高效率、执行更复杂的海洋任务,如海上联合作战^[91]、协同海洋测绘^[92]、通信自组网^[93]等。为了使多艘无人艇涌现出集群行为,编队控制方法常应用于无人艇集群运动,包括领航-跟随法^[94]、虚拟结构法^[95]和基于行为的方法^[96]等。为了减轻通信负担,文献[97-99]在领导-跟随控制框架下,采用单目相机测量领航者的相对位置,广泛开展了无人艇单目视觉伺服集群控制研究。如图6所示,Wang等^[97]采用艇载单目相机测量领航无人艇的视线距离和方位,在无人艇动力学模型(式(4))完全已知的条件下,根据反步法分别设计了运动学和动力学控制器,使无人艇保持期望的编队构形。由于领航无人艇容易脱离跟随无人艇的视野,他们还设计了切换控制器,利用混合控制方法优先保证相机视野。Panagou等^[98]同样关注了相机视野问题,采用偶极向量场设计无人艇编队控制器,并根据相机视野约束函数设计切换控制律,将领航无人艇保持在视觉感知范围内。为了避免编队瞬时状态违反相机视野约束,Wang等^[99]分别提出位置误差重映射方法、艏摇角误差重映射方法以及二者相结合方法,通过放大位置或艏摇角反馈误差来确保领航无人艇不脱离跟随无人艇的视野,并根据反步法设计了基于模型的无人艇动力学控制器,使3艘无人艇保持固定的三角形编队,且编队误差渐近稳定。

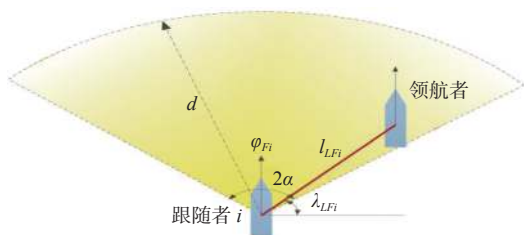


图6 基于单目视觉的无人艇集群任务^[97]

Fig. 6 The USV swarming task based on monocular visual servo^[97]

值得注意的是,单目视觉伺服编队控制方法往往要求多无人艇间保持固定的距离和方位,以此保持刚性的编队结构^[100]。然而,这种方式会使无人艇缺乏自主决策个体行为的能力,同时也在一定程度上丧失了整体结构的灵活性。对于多无人艇集群控制而言,最基础的问题是按照何种集群机制使其涌现出更加灵活智能的群体行为。实际上,自然界中广泛存在着集群行为,如鱼群、鸟群和牛群等。受这些生物行为的启发,Reynolds^[101]首次提出著名的Boid集群模型,包括聚集、分离和速度一致的3个集群原则,用于计算机模拟生物集群行为。在Reynolds规则的基础上,Vicsek模型^[102]、Cucker-Smale模型^[103]和Couzin模型^[104]

等也相继被提出,丰富了计算机模拟生物集群行为的类型。在机器人集群控制领域,研究人员也提出了许多Reynolds规则的变体和扩展方法,使集群个体具有更强的灵活性^[105]。Cheah等^[106]提出基于区域的多机器人集群方法,只要求机器人间保持安全距离,同时保持在预设的集群区域内,不指定机器人的次序和位置。类似于Boid模型,柔性集群机制^[107-112]也在无人艇集群控制中流行起来。这种柔性集群机制的全局控制目标更像是生物的集群行为,即保持期望的群体规模,而每艘无人艇个体并不指定具体的位置和艏向。在柔性集群机制下,无人艇采用GPS测量位置,Qin等^[107]采用分级控制方法合成无人艇动力学控制器;Liang等^[108]提出了新颖的分布式自组织集群控制框架;Liang等^[109]还研究了多无人艇集群控制的避碰问题;Tan等^[110]关注了多无人艇在受限水域的集群路径规划问题;Tan等^[111]还解决了动态海洋环境下无人艇隶属问题;Zhuang等^[112]采用3层控制环调节多无人艇在实际海洋环境下的运动行为。

尽管基于柔性集群机制的无人艇集群控制已广泛研究,但是将单目相机作为感知和定位传感器的视觉伺服方法还鲜有报道。为了模仿生物的集群行为,无人艇单目视觉伺服集群控制面临诸多实际挑战。如Olfati-Saber等^[113]所强调的多无人艇如何迁徙是影响其集群行为智能性的重要因素。Zhuang等^[112]通过远程无线网络向集群成员发送动态运动指令,引导无人艇运动。由于人的决策引入了控制闭环中,因此群体行为将更加智能。然而,远程遥控操作会受通信中断和延迟的影响,尤其对于远海集群任务,该问题会更加严重。另一种引导集群迁徙的普遍方法是预先定义一条全局的参考轨迹^[107]或路径^[108-112],再由无人艇群体的虚拟中心去跟踪。当然,简单的轨迹或路径不足以描述复杂的控制任务,而基于认知的高级智能更适合于决策群体的迁徙方向^[114]。可见,无人艇单目视觉伺服集群控制面临的实际挑战是在GPS拒止环境下如何引导无人艇协同运动,使集群行为更加智能。由于采用有限视野的单目相机感知周围环境,无人艇单目视觉伺服集群控制面临的另一挑战是如何从视觉的角度描述柔性集群规则,使涌现出来的集群行为更加灵活。

3 潜在研究方向及发展趋势

尽管机器人单目视觉伺服已发展40多年,但近年来才应用于无人艇的运动控制领域。因此,无人艇的单目视觉伺服自主控制技术远未成熟。

为了满足实际应用,无人艇单目视觉伺服系统的可靠性、稳定性和智能性等还有待提高。结合目前研究现状,未来无人艇的单目视觉伺服自主控制研究可从以下几个方面开展:

1) 自然场景环境感知。目前,无人艇的单目视觉伺服系统多工作在人工场景下,通过布置显著特征的视觉目标,便于无人艇感知周围环境和测量运动状态。从实用角度来看,布置人工场景会给无人艇的运动控制带来一定困难,尤其是面向深远海的工作场景。相较于人工场景,无人艇的真实工作环境更加复杂和多变。对于计算机而言,准确理解非结构化的自然环境至今依然充满挑战。因此,提高无人艇对复杂自然场景的环境感知能力,既是无人艇单目视觉伺服自主控制的重要研究方向,又是该技术付诸实际应用的必然要求。

2) 基于视觉的智能决策。无人艇作为轻量化的海洋机器人,其设计初衷是模仿人类完成预设任务。从控制角度来看,无人艇的运动控制正处在“人在环内”向“人在环上”过渡阶段,最终目标自然是“人在环外”,即完全自主。实际上,实现无人艇自动控制并非难事,难点是如何赋予无人艇人脑一样的思考能力,自主地决策其运动行为。尤其是对于无人艇的单目视觉伺服自主控制,单目相机使无人艇具有了探索世界的“眼睛”,如何利用新型结构的视觉数据,使无人艇伺服控制过程更加智能,是值得思考的问题。

3) 无标定免模型的视觉伺服控制方法。在无人艇单目视觉伺服自主控制建模时,需要根据相机透视投影原理和无人艇运动模型,将图像变化与无人艇运动联系起来。然而,任何运动模型都存在建模误差。另外,相机内、外部参数标定和无人艇模型参数辨识难免会引入测量误差。在建模和测量误差同时存在的情况下,无人艇视觉伺服控制系统将面临严重的鲁棒性问题。一方面,对于运动控制而言,相机参数标定和无人艇模型辨识是否有必要值得深入探讨。另一方面,无标定免模型(model-free)的视觉伺服方法更有利于实际应用,也是未来发展趋势。

4) 视觉伺服进程的运算实时性。无人艇单目视觉伺服自主控制包含图像采集、图像处理、目标识别、误差提取和无人艇控制等进程。图像信息为高维数据,需要占用大量内存,且整个伺服误差提取过程需要耗费一定时间,一直是影响机器人视觉伺服算法运算实时性的重要因素。受到视觉系统采用频率和处理速率的限制,无人艇单目视觉伺服系统控制频率一般较低,适用于慢

速度的控制任务。为了提高实际任务的反应速率和执行效率,无人艇单目视觉伺服自主控制对视觉系统运算性能提出了更高要求,需要在硬件提升和算法优化两个方面开展深入研究。

5) 多传感器数据融合技术。无人艇单目视觉伺服自主控制多以单目相机为传感器开展无人艇运动控制研究。该传感器能够直观地反映出环境信息,但也有其功能局限性,如相机视野受限、图像深度信息缺失、远距离视觉定位误差增大等。另外,无人艇一般还安装其他传感器,例如 GPS、IMU 和雷达等。显然,每种传感器都有其应用范围和突出优势。面向海洋复杂作业任务,单一的视觉传感器难以满足无人艇大范围和高性能控制需求,而多源数据融合技术可实现各类传感器优势互补^[15],提高无人艇海上生存和工作能力。

6) 无人艇单目视觉伺服多目标控制任务。当前,无人艇单目视觉伺服自主控制多研究单一控制问题,如航向控制、镇定控制、轨迹跟踪控制和集群控制等。然而,实际工程应用可能是多种目标按照时序复合而成的控制任务,远比以上单一问题要复杂。另外,无人艇航行在海面上,一方面需要将视觉目标保持在相机视野,另一方面还需避免与其他运动体和固定障碍物发生碰撞,保证航行安全。综合考虑以上实际问题,开展无人艇单目视觉伺服多目标控制研究十分必要。

4 结 语

自主性是无人艇的核心技术指标,单目视觉伺服是提高无人艇运动自主性的重要手段。本文首先从基本原理出发,分别简述了视觉伺服方法分类、相机透视投影原理和无人艇运动模型,为文献综述搭建基础框架。由于不同控制任务的调节变量、期望信号和无人艇数量各不相同,因此本文依次概述了无人艇单目视觉伺服航向控制、镇定控制、轨迹跟踪控制和集群控制的研究进展,并重点分析了单目视觉在以上典型任务场景中所面临的突出问题。随着新一代信息技术的快速发展,单目视觉伺服在提高无人艇运动自主性方面将发挥更大的作用,也必将面临更多挑战。本文最后深入梳理了未来研究方向和发展趋势,旨在为无人艇单目视觉伺服自主控制的应用和发展提供一定的技术支撑和理论参考。

参考文献:

[1] WANG N, GAO Y, YANG C, et al. Reinforcement learning-based finite-time tracking control of an unknown unmanned surface vehicle with input constraints

- [J]. *Neurocomputing*, 2022, 484: 26–37.
- [2] 廖煜雷, 陈聪聪, 杜廷朋, 等. 变输出无模型自适应无人艇艏向控制方法分析 [J/OL]. 中国舰船研究. (2023-04-06) [2023-05-01]. <http://www.ship-research.com/cn/article/doi/10.19693/j.issn.1673-3185.02989>
- LIAO Y L, CHEN C C, DU T P, et al. The research of variable output model-free adaptive heading control method of unmanned surface vehicle[J]. *Chinese Journal of Ship Research*. (2023-04-06) [2023-05-01]. <http://www.ship-research.com/cn/article/doi/10.19693/j.issn.1673-3185.02989> (in Chinese).
- [3] 谢伟, 陶浩, 龚俊斌, 等. 海上无人系统集群发展现状及关键技术研究进展 [J]. *中国舰船研究*, 2021, 16(1): 7–17, 31.
- XIE W, TAO H, GONG J B, et al. Research advances in the development status and key technology of unmanned marine vehicle swarm operation[J]. *Chinese Journal of Ship Research*, 2021, 16(1): 7–17, 31 (in Chinese).
- [4] WANG N, GAO Y, LIU Y J, et al. Self-learning-based optimal tracking control of an unmanned surface vehicle with pose and velocity constraints[J]. *International Journal of Robust and Nonlinear Control*, 2022, 32(5): 2950–2968.
- [5] 杨远鹏, 宋利飞, 茅嘉琪, 等. 基于混合采样深度 Q 网络的水面无人艇逃脱策略 [J/OL]. 中国舰船研究. (2023-04-17) [2023-05-01]. <http://www.ship-research.com/cn/article/doi/10.19693/j.issn.1673-3185.03105>.
- YANG Y P, SONG L F, MAO J Q, et al. Escape strategy of unmanned surface vehicle based on hybrid sampling deep Q network [J]. *Chinese Journal of Ship Research*. (2023-04-17) [2023-05-01]. <http://www.ship-research.com/cn/article/doi/10.19693/j.issn.1673-3185.03105> (in Chinese).
- [6] WANG N, ER M J. Direct adaptive fuzzy tracking control of marine vehicles with fully unknown parametric dynamics and uncertainties[J]. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2016, 24(5): 1845–1852.
- [7] WANG N, ER M J. Self-constructing adaptive robust fuzzy neural tracking control of surface vehicles with uncertainties and unknown disturbances[J]. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2015, 23(3): 991–1002.
- [8] WANG Y, JIANG B, WU Z G, et al. Adaptive sliding mode fault-tolerant fuzzy tracking control with application to unmanned marine vehicles[J]. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*, 2020, 51(11): 6691–6700.
- [9] 夏云鹏, 杨田田. 基于预测函数控制的水面无人船航向控制器设计 [J]. *舰船电子工程*, 2019, 39(7): 54–59.
- XIA Y P, YANG T T. Design of surface unmanned ship heading controller based on predictive function control [J]. *Ship Electronic Engineering*, 2019, 39(7): 54–59 (in Chinese).
- [10] WANG N, KARIMI H R. Successive waypoints tracking of an underactuated surface vehicle[J]. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2019, 16(2): 898–908.
- [11] LIU Z X, ZHANG Y M, YUAN C, et al. Adaptive path following control of unmanned surface vehicles considering environmental disturbances and system constraints[J]. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*, 2018, 51(1): 339–353.
- [12] WANG N, SU S F. Finite-time unknown observer-based interactive trajectory tracking control of asymmetric underactuated surface vehicles[J]. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2019, 29(2): 794–803.
- [13] HE S D, WANG M, DAI S L, et al. Leader-follower formation control of USVs with prescribed performance and collision avoidance[J]. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2018, 15(1): 572–581.
- [14] 慈文彦, 黄影平, 胡兴. 视觉里程计算法研究综述 [J]. *计算机应用研究*, 2019, 36(9): 2561–2568.
- CI W Y, HUANG Y P, HU X. Review of visual odometry algorithm[J]. *Application Research of Computers*, 2019, 36(9): 2561–2568 (in Chinese).
- [15] 丁文东, 徐德, 刘希龙, 等. 移动机器人视觉里程计综述 [J]. *自动化学报*, 2018, 44(3): 385–400.
- DING W D, XU D, LIU X L, et al. Review on visual odometry for mobile robots[J]. *Acta Automatica Sinica*, 2018, 44(3): 385–400 (in Chinese).
- [16] 卢荣胜, 史艳琼, 胡海兵. 机器人视觉三维成像技术综述 [J]. *激光与光电子学进展*, 2020, 57(4): 9–27.
- LU R S, SHI Y C, HU H B. Review of three-dimensional imaging techniques for robotic vision[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2020, 57(4): 9–27 (in Chinese).
- [17] 方勇纯. 机器人视觉伺服研究综述 [J]. *智能系统学报*, 2008, 3(2): 109–114.
- FANG Y C. A survey of robot visual servoing[J]. *CAAI Transactions on Intelligent Systems*, 2008, 3(2): 109–114 (in Chinese).
- [18] WANG N, SU S F, YIN J C, et al. Global asymptotic model-free trajectory-independent tracking control of an uncertain marine vehicle: an adaptive universe-based fuzzy control approach[J]. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 2018, 26(3): 1613–1625.
- [19] 林靖, 陈辉堂, 王月娟, 等. 机器人视觉伺服系统的研究 [J]. *控制理论与应用*, 2000, 17(4): 476–481.
- LIN J, CHEN H T, WANG Y J, et al. Research on robotic visual servoing system[J]. *Control Theory and Application*, 2000, 17(4): 476–481 (in Chinese).
- [20] SHIRAI Y, INOUE H. Guiding a robot by visual feed-

back in assembling tasks[J]. *Pattern Recognition*, 1973, 5(2): 99–108.

[21] HILL J, PARK W T. Real time control of a robot with a mobile camera[C]//*Proceedings of the 9th International Symposium on Industrial Robots*. Washington, DC, USA: SME, 1979: 233–246.

[22] 段彦婷, 蔡陈生, 王鹏飞, 等. 机器人视觉伺服技术发展概况综述 [J]. *伺服控制*, 2007(6): 16–18.
DUAN Y T, CAI C S, WANG P F, et al. Review of robot visual servo technique[J]. *Servo Control*, 2007(6): 16–18 (in Chinese).

[23] 赵清杰, 连广宇, 孙增圻. 机器人视觉伺服综述 [J]. *控制与决策*, 2001, 16(6): 849–853.
ZHAO Q J, LIAN G Y, SUN Z Q. Survey of robot visual servoing[J]. *Control and Decision*, 2001, 16(6): 849–853 (in Chinese).

[24] HORAUD R, DORNAILKA F, ESPIAU B. Visually guided object grasping[J]. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 1998, 14(4): 525–532.

[25] GUENARD N, HAMEL T, MAHONY R. A practical visual servo control for an unmanned aerial vehicle[J]. *IEEE Transactions on Robotics*, 2008, 24(2): 331–340.

[26] CHEN J, DIXON W E, DAWSON M, et al. Homography-based visual servo tracking control of a wheeled mobile robot[J]. *IEEE Transactions on Robotics*, 2006, 22(2): 406–415.

[27] KRUPÍŇSKI S, ALLIBERT G, HUA M D, et al. An inertial-aided homography-based visual servo control approach for (almost) fully actuated autonomous underwater vehicles[J]. *IEEE Transactions on Robotics*, 2017, 33(5): 1041–1060.

[28] HUTCHINSON S, HAGER G D, CORKE P I. A tutorial on visual servo control[J]. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 1996, 12(5): 651–670.

[29] CHAUMETTE F, HUTCHINSON S. Visual servo control. part I: basic approaches[J]. *IEEE Robotics & Automation Magazine*, 2006, 13(4): 82–90.

[30] CHAUMETTE F, HUTCHINSON S. Visual servo control. part II: advanced approaches[J]. *IEEE Robotics & Automation Magazine*, 2007, 14(1): 109–118.

[31] STANIAK M, ZIELIŇSKI C. Structures of visual servos [J]. *Robotics and Autonomous Systems*, 2010, 58(8): 940–954.

[32] AZIZIAN M, KHOSH NAM M, NAJMAEI N, et al. Visual servoing in medical robotics: a survey. part I: endoscopic and direct vision imaging-techniques and applications[J]. *The International Journal of Medical Robotics and Computer Assisted Surgery*, 2014, 10(3): 263–274.

[33] AZIZIAN M, NAJMAEI N, KHOSH NAM M, et al. Visual servoing in medical robotics: a survey. part II: tomographic imaging modalities-techniques and applications[J]. *The International Journal of Medical Robotics and Computer Assisted Surgery*, 2015, 11(1): 67–79.

[34] 王麟琨, 徐德, 谭民. 机器人视觉伺服研究进展 [J]. *机器人*, 2004, 26(3): 277–282.
WANG L K, XU D, TAN M. Survey of research on robotic visual servoing[J]. *Robot*, 2004, 26(3): 277–282 (in Chinese).

[35] 薛定宇, 项龙江, 司秉玉, 等. 视觉伺服分类及其动态过程 [J]. *东北大学学报 (自然科学版)*, 2003, 24(6): 543–547.
XUE D Y, XIANG L J, SI B Y, et al. Classification of robotics visual servoing and its dynamics investigation[J]. *Journal of Northeastern University (Natural Science)*, 2003, 24(6): 543–547 (in Chinese).

[36] 倪受东, 刘洋, 袁祖强. 机器人视觉伺服综述 [J]. *机床与液压*, 2007(9): 232–235.
NI S D, LIU Y, YUAN Z Q. Review of robot visual servoing[J]. *Machine Tool & Hydraulics*, 2007(9): 232–235 (in Chinese).

[37] 贾丙西, 刘山, 张凯祥, 等. 机器人视觉伺服研究进展: 视觉系统与控制策略 [J]. *自动化学报*, 2015, 41(5): 861–873.
JIA B X, LIU S, ZHANG K X, et al. Survey on robot visual servo control: vision system and control strategies [J]. *Acta Automatica Sinica*, 2015, 41(5): 861–873 (in Chinese).

[38] 徐德. 单目视觉伺服研究综述 [J]. *自动化学报*, 2018, 44(10): 1729–1746.
XU D. A tutorial for monocular visual servoing[J]. *Acta Automatica Sinica*, 2018, 44(10): 1729–1746 (in Chinese).

[39] 杨月全, 秦瑞康, 李福东, 等. 机器人视觉伺服控制研究进展与挑战 [J]. *郑州大学学报 (理学版)*, 2018, 50(2): 41–48.
YANG Y Q, QIN R K, LI F D, et al. The development and challenges of studies on robot visual servo control[J]. *Journal of Zhengzhou University (Natural Science Edition)*, 2018, 50(2): 41–48 (in Chinese).

[40] WU J H, JIN Z H, LIU A D, et al. A survey of learning-based control of robotic visual servoing systems[J]. *Journal of the Franklin Institute*, 2021, 359(2022): 556–577.

[41] HUANG Y, SU J B. Visual servoing of nonholonomic mobile robots: a review and a novel perspective[J]. *IEEE Access*, 2019, 7: 134968–134977.

[42] SØRENSEN A J. A survey of dynamic positioning control systems[J]. *Annual Reviews in Control*, 2011, 35(1): 123–136.

[43] WANG J, LIU J Y, YI H. A modular designed dynamic positioning experiment system and its application on a ship model[C]//*OCEANS 2016*. Shanghai, China: IEEE, 2016: 1–6.

[44] HU B B, Zhang H T. Bearing-only motional target-surrounding control for multiple unmanned surface vessels

- [J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2022, 69(4): 3988–3997.
- [45] LOWE D G. Distinctive image features from scale-invariant keypoints[J]. *International Journal of Computer Vision*, 2004, 60(2): 91–110.
- [46] BAY H, TUYTELAARS T, GOOL L V. SURF: speeded up robust features[C]//Proceedings of the 9th European conference on Computer Vision(ECCV'06) - Volume Part I. Berlin, Germany: Springer, 2006: 404–417.
- [47] LEUTENEGGER S, CHLI M, SIEGWART R Y. BRISK: Binary robust invariant scalable keypoints[C]//Proceedings of International Conference on Computer Vision. Barcelona, Spain: IEEE, 2011: 2548–2555.
- [48] TSAI R. A versatile camera calibration technique for high-accuracy 3D machine vision metrology using off-the-shelf TV cameras and lenses[J]. *IEEE Journal on Robotics and Automation*, 1987, 3(4): 323–344.
- [49] 胡培成, 黎宁, 周建江. 一种改进的基于圆环点的摄像机自标定方法 [J]. *光电工程*, 2007, 34(12): 54–60.
HU P C, LI N, ZHOU J J. Improved camera self-calibration method based on circular points[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2007, 34(12): 54–60 (in Chinese).
- [50] ZHANG Z. A flexible new technique for camera calibration[J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2000, 22(11): 1330–1334.
- [51] FOSSEN T I. Handbook of marine craft hydrodynamics and motion control[M]. New York: John Wiley & Sons, 2011.
- [52] DO K D, PAN J. Global robust adaptive path following of underactuated ships[J]. *Automatica*, 2006, 42(10): 1713–1722.
- [53] DAI S L, HE S D, Lin H, et al. Platoon formation control with prescribed performance guarantees for USVs [J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2017, 65(5): 4237–4246.
- [54] ZHAO J X, WANG J H, ZHENG X. Visual servo-based method for bridge crossing of unmanned surface vehicle[J]. *International Core Journal of Engineering*, 2020, 6(12): 276–284.
- [55] ZHAO J X, WANG J H, ZHENG X, et al. Research on USV sailing through the bridge with visual servo [C]//Global Oceans 2020: Singapore - U. S. Gulf Coast. Singapore: IEEE, 2020: 1–6.
- [56] EKELMANN J, BUTKA B. Seagle 3.0 an autonomous surface vehicle[C]//Proceedings of IEEE Southeastcon. Orlando, FL, USA: IEEE, 2012: 1–5.
- [57] 徐海彬, 刘畅, 田建东, 等. 基于视觉和定位系统的无人艇自主对接系统 [J]. *计算机工程与设计*, 2021, 42(9): 2606–2613.
XU H B, LIU C, TIAN J D, et al. Autonomous docking system for USV based vision and position system [J]. *Computer Engineering and Design*, 2021, 42(9): 2606–2613 (in Chinese).
- [58] MARTINS A, ALMEIDA J M, FERREIRA H, et al. Autonomous surface vehicle docking manoeuvre with visual information[C]//Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation. Rome, Italy: IEEE, 2007: 4994–4999.
- [59] DUNBABIN M, LANG B, WOOD B. Vision-based docking using an autonomous surface vehicle[C]//Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation. Pasadena, CA, USA: IEEE, 2008: 26–32.
- [60] KIM Y H, LEE S W, Yang H S, et al. Toward autonomous robotic containment booms: visual servoing for robust inter-vehicle docking of surface vehicles[J]. *Intelligent Service Robotics*, 2012, 5(1): 1–18.
- [61] 张山甲, 王建华, 郑翔, 等. 基于视觉伺服的欠驱动无人水面艇自主靠泊方法 [J]. *船舶工程*, 2020, 42(7): 144–151.
ZHANG S J, WANG J H, ZHENG X, et al. Autonomous berthing method of underactuated unmanned surface vehicle based on visual servo[J]. *Ship Engineering*, 2020, 42(7): 144–151 (in Chinese).
- [62] WANG N, HE H K. Adaptive homography-based visual servo for micro unmanned surface vehicles[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2019, 105(12): 4875–4882.
- [63] WANG N, HE H K. Extreme learning-based monocular visual servo of an unmanned surface vessel[J]. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2021, 17(8): 5152–5163.
- [64] WANG N, HE H K. Dynamics-level finite-time fuzzy monocular visual servo of an unmanned surface vehicle [J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2020, 67(11): 9648–9658.
- [65] 何红坤, 王宁. 欠驱动无人船单目视觉伺服镇定控制 [J]. *中国舰船研究*, 2022, 17(5): 166–174, 183.
HE H K, WANG N. Monocular visual servo-based stabilization control of underactuated unmanned surface vehicle, *Chinese Journal of Ship Research*, 2022, 17(5): 166–174, 183 (in both Chinese and English).
- [66] HE H K, WANG N. Monocular visual servo of unmanned surface vehicles with view-field constraints [C]//Proceedings of the 33rd Chinese Control and Decision Conference. Kunming, China: IEEE, 2021: 973–978.
- [67] MARCHAND E, UCHIYAMA H, SPINDLER F. Pose estimation for augmented reality: a hands-on survey[J]. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 2015, 22(12): 2633–2651.
- [68] WANG K, LIU Y H, LI L Y. Vision-based tracking control of underactuated water surface robots without direct position measurement[J]. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2015, 23(6): 2391–2399.
- [69] LEFEBER E, PETTERSEN K Y, NIJMEIJER H. Track-

ing control of an underactuated ship[J]. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2003, 11(1): 52–61.

[70] WANG K, LIU Y H, LI L Y. Vision-based tracking control of nonholonomic mobile robots without position measurement[C]//*Proceedings of 2013 IEEE International Conference on Robotics and Automation*. Karlsruhe, Germany: IEEE, 2013: 5265–5270.

[71] WANG K, LIU Y H, LI L Y. Visual servoing trajectory tracking of nonholonomic mobile robots without direct position measurement[J]. *IEEE Transactions on Robotics*, 2014, 30(4): 1026–1035.

[72] LIANG X W, LIU Y H, WANG H S, et al. Leader-following formation tracking control of mobile robots without direct position measurements[J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2016, 61(12): 4131–4137.

[73] WANG K, LIU Y H, LI L Y. A simple and parallel algorithm for real-time robot localization by fusing monocular vision and odometry/AHRS sensors[J]. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2014, 19(4): 1447–1457.

[74] WANG N, LV S L, ZHANG W D, et al. Finite-time observer based accurate tracking control of a marine vehicle with complex unknowns[J]. *Ocean Engineering*, 2017, 145: 406–415.

[75] WANG N, LV S L, ER M J, et al. Fast and accurate trajectory tracking control of an autonomous surface vehicle with unmodeled dynamics and disturbances[J]. *IEEE Transactions on Intelligent Vehicles*, 2017, 1(3): 230–243.

[76] WANG N, KARIMI H R, LI H Y, et al. Accurate trajectory tracking of disturbed surface vehicles: a finite-time control approach[J]. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2019, 24(3): 1064–1074.

[77] ZHENG D L, WANG H S, CHEN W D, et al. Planning and tracking in image space for image-based visual servoing of a quadrotor[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2018, 65(4): 3376–3385.

[78] ZHANG X T, FANG Y C, ZHANG X B, et al. Attitude-constrained time-optimal trajectory planning for rotorcrafts: theory and application to visual servoing[J]. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2020, 25(4): 1912–1921.

[79] WANG R H, ZHANG X B, FANG Y C, et al. Virtual-goal-guided RRT for visual servoing of mobile robots with FOV constraint[J]. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*, 2021, 52(4): 2073–2083.

[80] CHESI G, HASHIMOTO K, PRATTICCHIZZO D, et al. Keeping features in the field of view in eye-in-hand visual servoing: a switching approach[J]. *IEEE Transactions on Robotics*, 2004, 20(5): 908–914.

[81] MURRIERI P, FONTANELLI D, BICCHI A. A hybrid control approach to the parking problem of a wheeled vehicle using limited view-angle visual feedback[J]. *The International Journal of Robotics Research*, 2004, 23(4/5): 437–448.

[82] GANS N R, HUTCHINSON S A. Stable visual servoing through hybrid switched-system control[J]. *IEEE Transactions on Robotics*, 2007, 23(3): 530–540.

[83] BECHLIOULIS C P, HESHMATI-ALAMDARI S, KARRAS G C, et al. Robust image-based visual servoing with prescribed performance under field of view constraints[J]. *IEEE Transactions on Robotics*, 2019, 35(4): 1063–1070.

[84] MIAO Z, ZHONG H, LIN J, et al. Vision-based formation control of mobile robots with FOV constraints and unknown feature depth[J]. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2020, 29(5): 2231–2238.

[85] LIN J, MIAO Z Q, ZHONG H, et al. Adaptive image-based leader-follower formation control of mobile robots with visibility constraints[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2020, 68(7): 6010–6019.

[86] FANG Y C, LIU X, ZHANG X B. Adaptive active visual servoing of nonholonomic mobile robots[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2011, 59(1): 486–497.

[87] CHEN X H, JIA Y M. Adaptive leader-follower formation control of non-holonomic mobile robots using active vision[J]. *IET Control Theory & Applications*, 2015, 9(8): 1302–1311.

[88] WAI R J, LIN Y W. Adaptive moving-target tracking control of a vision-based mobile robot via a dynamic petri recurrent fuzzy neural network[J]. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 2012, 21(4): 688–701.

[89] FRED A L, ORIOLO G. Vision-based interception of a moving target with a nonholonomic mobile robot[J]. *Robotics and Autonomous Systems*, 2007, 55(6): 419–432.

[90] MA H X, ZOU W, ZHU Z, et al. Moving to OOP: an active observation approach for a novel composite visual servoing configuration[J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2020, 70: 1–15.

[91] 何兆一, 刘海颖, 黄魁华, 等. 面向联合全域作战的海上无人集群协同防御行动策略设计[J]. *指挥与控制学报*, 2022, 8(1): 44–49.

HE Z Y, LIU H Y, HUANG K H, et al. Strategy design of maritime unmanned cluster cooperative defense for joint all-domain operations[J]. *Journal of Command and Control*, 2022, 8(1): 44–49 (in Chinese).

[92] 周健, 王晨旭, 张安民. 基于双体结构的无人测绘艇航向控制[J]. *科学技术与工程*, 2020, 20(16): 6510–6514.

ZHOU J, WANG C X, ZHANG A M. Course control of unmanned surveying and mapping vehicle based on catamaran structure[J]. *Science Technology and Engineering*, 2020, 20(16): 6510–6514 (in Chinese).

- [93] 张瑞杰, 彭琳琳, 付林罡, 等. 海上无人船自组网随机接入仿真研究[J]. 遥测遥控, 2020, 41(5): 29–35.
ZHANG R J, PENG L L, FU L G, et al. Random access technique for unmanned surface vehicle ad-hoc network[J]. Journal of Telemetry, Tracking and Command, 2020, 41(5): 29–35 (in Chinese).
- [94] WANG N, LI H. Leader-follower formation control of surface vehicles: a fixed-time control approach[J]. *ISA Transactions*, 2022, 124: 356–364.
- [95] KANJANAWANISHKUL K. Coordinated path following for mobile robots using a virtual structure strategy with model predictive control[J]. *Automatika*, 2014, 55(3): 287–298.
- [96] BALCH T, ARKIN R C. Behavior-based formation control for multirobot teams[J]. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 1998, 14(6): 926–939.
- [97] WANG J, LIU J Y, YI H. Formation control of unmanned surface vehicles with vision sensor constraints[C]//MTS/IEEE Oceans, Washington, DC, USA: IEEE, 2015: 1–8.
- [98] PANAGOU D, KYRIAKOPOULOS K J. Cooperative formation control of underactuated marine vehicles for target surveillance under sensing and communication constraints[C]//Proceedings of 2013 IEEE International Conference on Robotics and Automation. Karlsruhe, Germany: IEEE, 2013: 1871–1876.
- [99] WANG J, LIU J Y, YI H. Formation control of unmanned surface vehicles with sensing constraints using exponential remapping method[J]. *Mathematical Problems in Engineering*, 2017, 2027(pt.8): 1–14.
- [100] DAI S L, HE S D, CHEN X, et al. Adaptive leader-follower formation control of nonholonomic mobile robots with prescribed transient and steady-state performance[J]. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2020, 16(6): 3662–3671.
- [101] REYNOLDS C W. Flocks, herds and schools: a distributed behavioral model[J]. *ACM SIGGRAPH Computer Graphics*, 1987, 21(4): 25–34.
- [102] VISCEK T, CZIRÓK A, BEN-JACOB E, et al. Novel type of phase transition in a system of self-driven particles[J]. *Physical Review Letters*, 1995, 75(6): 1226–1229.
- [103] CUCKER F, SMALE S. Emergent behavior in flocks[J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2007, 52(5): 852–862.
- [104] COUZINI D, KRAUSE J, JAMES R, et al. Collective memory and spatial sorting in animal groups[J]. *Journal of Theoretical Biology*, 2002, 218(1): 1–11.
- [105] SU H S, WANG X F, LIN Z L. Flocking of multi-agents with a virtual leader[J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2009, 54(2): 293–307.
- [106] CHEAH C C, HOU S P, SLOTINE J J E. Region-based shape control for a swarm of robots[J]. *Automatica*, 2009, 45(10): 2406–2411.
- [107] QIN Z H, LIN Z, YANG D M, et al. A task-based hierarchical control strategy for autonomous motion of an unmanned surface vehicle swarm[J]. *Applied Ocean Research*, 2017, 65: 251–261.
- [108] LIANG X, QU X R, WANG N, et al. A novel distributed and self-organized swarm control framework for underactuated unmanned marine vehicles[J]. *IEEE Access*, 2019, 7: 112703–112712.
- [109] LIANG X, QU X R, WANG N, et al. Swarm control with collision avoidance for multiple underactuated surface vehicles[J]. *Ocean Engineering*, 2019, 191: 106–116.
- [110] TANG G, ZOU J, ZHUANG J Y, et al. Fast marching square method based intelligent navigation of the unmanned surface vehicle swarm in restricted waters[J]. *Applied Ocean Research*, 2020, 95: 102–117.
- [111] TANG G, ZHUANG J Y, ZOU J, et al. Artificial potential field-based swarm finding of the unmanned surface vehicles in the dynamic ocean environment[J]. *International Journal of Advanced Robotic Systems*, 2020, 17(3): 1–16.
- [112] ZHUANG J Y, ZHANG L, QIN Z H, et al. Motion control and collision avoidance algorithms for unmanned surface vehicle swarm in practical maritime environment[J]. *Polish Maritime Research*, 2019, 26(1): 107–116.
- [113] OLFATI-SABER R. Flocking for multi-agent dynamic systems: algorithms and theory[J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2006, 51(3): 401–420.
- [114] FRANCHI A, SECCHI C, SON H I, et al. Bilateral teleoperation of groups of mobile robots with time-varying topology[J]. *IEEE Transactions on Robotics*, 2012, 28(5): 1019–1033.
- [115] 李勇, 顾夏, 罗尹政, 等. 基于多传感器融合的菌剂投放船[J]. *广西大学学报(自然科学版)*, 2022, 47(2): 406–416.
LI Y, GU X, LUO Y Z, et al. A multi-sensor-based independent microbial inoculum delivery ship[J]. *Journal of Guangxi University (Natural Science Edition)*, 2022, 47(2): 406–416 (in Chinese).