

引用格式: 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[J]. Chinese Journal of Ship Research, 2022, 17(5): 166–174, 183.

# 欠驱动无人船单目视觉伺服 镇定控制



扫码阅读全文

何红坤<sup>1</sup>, 王宁<sup>\*2</sup>

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

**摘要:** [目的] 针对全球定位系统拒止环境下的欠驱动无人船(USV)精准位姿镇定问题, 提出一种基于单应性的欠驱动无人船单目视觉伺服镇定控制方法。 [方法] 借助单应性分解技术, 直接从当前图像和期望图像中重构出具有未知尺度因子的位姿误差, 可完全摆脱相机外部参数标定和目标物先验信息; 针对欠驱动约束, 在连续时变输出反馈控制器中引入基于持续激励艏摇角的周期函数, 使得欠驱动无人船能够在图像深度、运动速度、模型参数均未知的情况下实现镇定控制。 [结果] 在李雅普诺夫理论框架下, 采用芭芭拉引理严格证明了欠驱动无人船视觉伺服闭环控制系统的渐近稳定性。 [结论] 仅采用船载单目相机, 所提出的视觉伺服策略能够确保欠驱动无人船实现精准位姿镇定, 为海上接驳对接、靠离泊、动力定位等实际需求提供重要技术支撑。

**关键词:** 欠驱动无人船; 单目视觉伺服; 镇定控制; 连续时变输出反馈

中图分类号: U664.82

文献标志码: A

DOI: 10.19693/j.issn.1673-3185.02853

## Monocular visual servo-based stabilization control of underactuated unmanned surface vehicle

HE Hongkun<sup>1</sup>, WANG Ning<sup>\*2</sup>

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

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

**Abstract:** [Objectives] Aiming at the accurate posture stabilization problem of an under-actuated unmanned surface vehicle (USV) in GPS-denied environments, a monocular visual servo stabilization control scheme is proposed based on homography. [Methods] By virtue of the homography decomposition technique, posture errors with an unknown scale factor are directly reconstructed from current and desired images, which thoroughly removes the calibration of extrinsic camera parameters and priori information on visual targets; with respect to the under-actuation constraint, a periodic function to persistently excite the yaw angle is incorporated into the continuous time-variant output feedback controller, allowing the USV to be stabilized in the absence of image depth, movement velocities and model parameters. [Results] Under the framework of the Lyapunov theory, the closed-loop visual servo system of the USV is rigorously proven to be asymptotically stable by Barbalat lemma. [Conclusions] By installing an onboard monocular camera, USV posture errors can be precisely stabilized with the aid of the proposed visual servo strategy, providing significant technique support for practical applications including docking, berthing, dynamic positioning, etc.

**Key words:** underactuated unmanned surface vehicle; monocular visual servo; stabilization control; continuous time-variant output feedbacks

收稿日期: 2022-04-15 修回日期: 2022-08-11 网络首发时间: 2022-09-30 13:21

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)

作者简介: 何红坤, 男, 1988年生, 博士生。研究方向: 无人船视觉伺服控制。E-mail: [hehongkun4@163.com](mailto:hehongkun4@163.com)

王宁, 男, 1983年生, 博士, 教授, 博士生导师。研究方向: 海洋机器人、无人船和自主系统的智能控制。

E-mail: [n.wang@ieec.org](mailto:n.wang@ieec.org)

\*通信作者: 王宁

## 0 引言

随着经济社会发展,人类水上活动日益频繁。无人船(USV)作为轻量化的水面机器人,可以将人类从重复和危险的作业任务中解脱出来,因而受到了各国研究者的广泛关注<sup>[1-4]</sup>。值得注意的是,运动控制是实现无人船自主作业的核心技术,其中镇定控制是无人船运动控制的基本问题,在入坞、靠离泊、接驳对接、动力定位等领域中具有巨大的应用价值和市场前景。

为了减少重量和降低成本,无人船往往在船艏布置两个推进器或单桨单舵,但只能提供纵荡推力和艏摇力矩。实际上,这种动力配置方式为无人船镇定控制器设计带来很大困难。主要原因是无人船的欠驱动属性,即利用两个控制输入同时镇定无人船的3个运动状态,包括平面位置和艏摇角度。对于欠驱动无人船镇定系统,由于受到不可积的二阶非完整约束,不存在任何连续时变的反馈控制律,使该系统在李雅普诺夫意义下渐近稳定<sup>[5]</sup>。此外,欠驱动无人船镇定系统具有高度的非线性,不能转换成积分链形式,使得标准的链式系统控制方法不能直接应用<sup>[6]</sup>。为解决欠驱动无人船镇定控制问题,各国学者相继提出了非连续时不变和连续时变控制器设计方法。在非连续时不变控制器设计方面,Reyhanoglu<sup>[7]</sup>提出 $\sigma$ 变换法,在艏摇角误差不为0的前提下设计不连续的坐标变换,并在运动学上设计降阶系统控制输入,最终构造了时不变的非连续反馈控制律,保证了位姿误差以指数收敛速率渐近稳定;Ghommam等<sup>[8]</sup>提出了级联控制法,采用微分同胚坐标变换将无人船系统转化为级联形式,原问题由此简化为一个三阶链式系统的镇定控制问题,在艏摇角误差不为0的前提下,推导了时不变的非连续反馈控制律,保证系统全局一致渐近稳定。在连续时变控制器设计方面,Petterson等<sup>[9]</sup>提出齐次法,采用坐标变换方法在附体坐标系下表示无人船镇定系统的动态,设计了具有周期震荡性能的时变反馈控制律,利用齐次度和平均理论证明了闭环系统指数收敛;Mazenc等<sup>[10]</sup>提出反步设计法,通过坐标变换巧妙地建立了等价的被控系统,在光滑时变的状态反馈控制器中引入周期函数,使得欠驱动无人船镇定系统在李雅普诺夫意义下全局一致渐近稳定;在级联控制框架下,Dong等<sup>[11]</sup>利用反步法设计了全局光滑时变控制律,使得闭环系统状态渐近收敛到原点。董早鹏等<sup>[12]</sup>提出了极坐标系下分块反步控制法,利用已知的侧滑角将无人船直角坐标系下的欠驱动镇定

控制问题转化为极坐标系下的全驱动镇定控制问题,降低了控制器的设计难度。

尽管欠驱动无人船镇定控制研究已经取得了丰硕的理论成果,但多数文献均假设无人船的位置是精确已知的。实际上,无人船常采用GPS装置来测量位置,甚至测量运动速度,一般定位精度只有米量级<sup>[13]</sup>。另外,在港口、河道等高大建筑或树木遮挡水域,GPS存在着信号衰减和丢失的问题,使得以上控制算法在该场景下不能使用。随着人工智能技术快速发展和计算机运算能力的飞速提升,视觉伺服方法依赖于光学相机的高精度定位能力,在无人船运动控制中展现出显著的优越性<sup>[14]</sup>。相较于双目视觉伺服和多目视觉伺服,单目视觉伺服处理的图像更少,更能满足伺服过程对计算实时性的要求。目前,单目视觉伺服多应用于无人船对接和靠离泊任务中。在国外,Martins等<sup>[15]</sup>假设黄色潜航器漂浮于水面,在单目相机内、外部参数均标定的条件下解算无人船与潜航器的相对位置和方向,根据二者之间的距离设计了事件触发控制策略,通过比例微分状态反馈控制两个螺旋桨转速,依次完成接近、对齐和对接任务;Dunbabin等<sup>[16]</sup>利用标定的单目相机高度和倾斜角定位水面目标物的位置,根据相对距离产生虚拟的吸引和排斥力,将它们的方向设定为无人船的期望艏摇角度,利用比例控制器调节两个螺旋桨的输出推力,改变无人船的位置和姿态,实现无人船与水面目标物的对接;Kim等<sup>[17]</sup>在距离较近时采用单目视觉确定目标物的位置和姿态,利用伪逆技术和强化学习方法分别设计了比例控制器和无模型控制策略,伺服控制无人船与水面机器人对接。在国内,徐海彬等<sup>[18]</sup>利用检测网络识别悬浮托架,根据其投影图像和相机内部参数计算无人船偏转角,在油门恒定的情况下,融合偏转角的比例微分信号设计了舵角S面控制器,通过实时控制舵角,使无人船不断靠近托架,直至完成对接任务;张山甲等<sup>[19]</sup>以红色矩形面作为单目相机识别标志物,利用当前图像、期望图像、相机内部参数和标志物标定高度计算无人船航向偏差角及偏航距离,并以此为控制变量设计了比例微分控制器,调节艏部两个推进机电电压,改变无人船纵荡速度和艏摇角速率,使欠驱动无人船沿着叠标线靠近泊位。由于利用了二维图像恢复三维空间信息是个欠约束问题,因此,以上单目视觉伺服方法在相对定位时需要提前标定相机外部参数或已知目标物模型信息。为便于实际应用,Wang等<sup>[20-22]</sup>在单目相机外部参数未标定的条件下,采用基于单应性的伺服

策略,系统开展了全驱动无人船视觉伺服镇定控制研究。在文献[20]中,利用当前图像和期望图像直接获取具有尺度因子的无人船位姿误差,首次建立了基于单应性的无人船单目视觉伺服框架,采用参数自适应方法估计未知的图像深度,实现了无人船镇定系统渐近稳定。在文献[21]中,针对图像深度、无人船模型参数、外界扰动未知问题,采用单隐层神经网络辨识系统未知非线性,提出了基于极速学习的视觉伺服方法,通过李雅普诺夫函数设计控制器和自适应律,使得全驱动无人船位姿误差一致有界。进一步考虑到GPS拒止环境下无人船运动速度难以测量问题,文献[22]通过有限时间观测器恢复系统状态,形成了输出反馈的视觉伺服策略,只利用船载单目相机实现全驱动无人船镇定系统渐近稳定。

受到以上文献启发,本文将开展欠驱动无人船单目视觉伺服镇定控制研究,仅依赖一只“眼睛”,实现欠驱动无人船渐渐靠近期望位姿。首先,采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船位姿误差,不需要提前标定相机外部参数或已知目标物模型信息。与采用GPS的控制系统不同的是,单应性分解技术必然导致未知的图像深度出现在无人船运动学子系统中,造成规避欠驱动约束的坐标变换方法<sup>[7-11]</sup>不再适用。其次,考虑到无人船运动速度和模型参数难以精确获取的实际问题,设计连续时变输出反馈控制器,克服不可积的二阶非完整约束,同时不依赖于速度状态和模型参数。然后,在李雅普诺夫理论框架下,利用芭芭拉引理严格证明闭环伺服控制系统的稳定性。最后,仿真实验验证该视觉伺服策略的有效性。本文提出的单目视觉伺服控制方案能够在图像深度、运动速度、模型参数均未知的条件下,实现欠驱动无人船镇定控制系统渐近稳定。这项研究工作可以扩大欠驱动无人船在GPS拒止场景下的应用、丰富欠驱动无人船镇定控制理论、提高欠驱动无人船的自主性和智能性。

## 1 基础知识与问题描述

### 1.1 基础知识

为了便于阅读,本文涉及的关键引理,如矩阵正定性判别方法、赫尔维茨判据、芭芭拉引理集中陈述如下。

引理1<sup>[23]</sup>: 设矩阵  $A \in \mathbf{R}^{n \times n}$ ,  $A = A^T$ , 其中,  $\mathbf{R}$  表示实数集。若  $A$  的各阶顺序主子式  $\Delta_i > 0$  ( $i=1, \dots, n$ ), 则  $A$  正定。

引理2<sup>[24]</sup>: 设二阶线性定常系统  $\dot{x} = Ax$  的特征多项式为  $a_2s^2 + a_1s + a_0 = 0$ 。若  $a_i > 0$  ( $i=0, 1, 2$ ), 则有一个正定矩阵  $P \in \mathbf{R}^{2 \times 2}$  使李雅普诺夫方程  $A^T P + PA = -I$  有唯一解, 单位矩阵  $I \in \mathbf{R}^{2 \times 2}$ 。

引理3<sup>[25]</sup>: 设函数  $\varphi: [0, \infty) \rightarrow \mathbf{R}$  平方可积, 即  $\lim_{t \rightarrow \infty} \int_0^t \varphi^2(s) ds < \infty$ 。若  $\dot{\varphi}(t)$  存在且有界, 则  $\lim_{t \rightarrow \infty} \varphi(t) = 0$ 。

引理4<sup>[26]</sup>: 若函数  $\varphi: [0, \infty) \rightarrow \mathbf{R}$  一致连续, 若  $\lim_{t \rightarrow \infty} \int_0^t \varphi(s) ds$  存在且有界, 则  $\lim_{t \rightarrow \infty} \varphi(t) = 0$ 。

### 1.2 无人船镇定控制系统模型

对于欠驱动无人船在水面上完成靠离泊、对接、动力定位等操纵任务, 可以将它们抽象为由当前位姿到期望位姿的镇定控制问题, 其运动学和动力学数学模型可描述为<sup>[6-11]</sup>

$$\begin{cases} \dot{\eta} = R(\psi)v \\ M\dot{v} = -C(v)v - D(v)v + \tau \end{cases} \quad (1)$$

其中,

$$C(v) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & -m_{22}v \\ 0 & 0 & m_{11}u \\ m_{22}v & -m_{11}u & 0 \end{bmatrix}$$

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

式中:  $\eta = [x, y, \psi]^T$ , 为当前位姿向量, 包括无人船在惯性坐标系下的位置  $(x, y)$  和艏摇角  $\psi$ , 位置变量单位为 m, 姿态变量单位为 rad;  $v = [u, v, r]^T$ , 为速度向量, 表示无人船在附体坐标系下的纵/横荡速度  $(u, v)$  和艏摇角速率  $r$ , 线速度单位为 m/s, 角速度单位为 rad/s;  $\tau = [\tau_u, 0, \tau_r]^T$ , 为系统控制输入向量, 输入力单位为 N, 输入力矩单位为  $\text{N} \cdot \text{m}$ ;  $M = \text{diag}(m_{11}, m_{22}, m_{33}) > 0$  和  $D(v) = \text{diag}(d_{11}, d_{22}, d_{33}) > 0$  分别为惯性质量矩阵和系统阻尼矩阵;  $C(v)$  为科里奥利向心矩阵;  $R(*)$  为关于姿态变量“\*”的旋转矩阵函数。

为了调节无人船由当前位姿到达期望位姿, 定义位姿误差向量  $e = R^T(\psi)(\eta_d - \eta)$ 。结合式(1), 对  $e$  求导, 得到镇定误差动态如下:

$$\begin{cases} \dot{e}_1 = -u + e_2 r \\ \dot{e}_2 = -v - e_1 r \\ \dot{e}_3 = -r \end{cases} \quad (2)$$

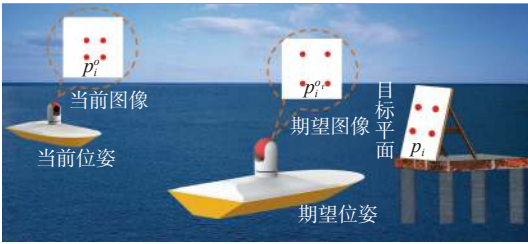
式中:  $e := [e_1, e_2, e_3]^T$ ;  $\eta_d = [x_d, y_d, \psi_d]^T$ , 为恒定的期望位姿向量。

### 1.3 无人船单目视觉伺服动态

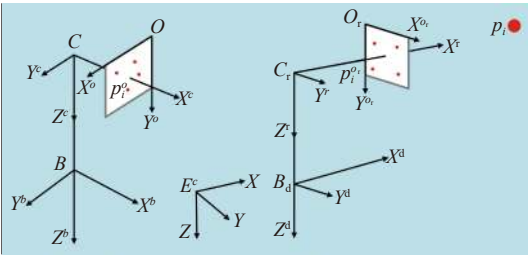
在GPS拒止环境下, 无人船的当前位置  $(x, y)$

和期望位置 $(x_d, y_d)$ 是难以获得的。为此, 将一个单目相机安装在无人船上, 如图 1 (a) 所示, 用来感知周围环境并实现相对定位。另外, 在目标平面上布置一系列特征点 (图 1 (a) 中的红色发光二极管), 以此形成基于单应性的无人船单目视觉伺服镇定控制任务场景。

为了便于接下来描述各参数的含义, 按照右手定则建立与图 1 (a) 相对应的三维坐标系, 如图 1 (b) 所示, 包括地球惯性坐标系  $E-XYZ$ 、无人船附体坐标系  $B-X^bY^bZ^b$  和相机坐标系  $C-X^cY^cZ^c$ , 其中原点  $C$  为相机光心, 光轴  $X^c$  朝向船艏正前方;  $B-X^bY^bZ^b$  位于  $C-X^cY^cZ^c$  正下方, 且与之保持固定的平行关系; 与惯例相同,  $E-XYZ$  选择为北东下坐标系。另外,  $O-X^oY^o$  为二维图像坐标系, 原点  $O$  位于图像左上角,  $X^o$  轴水平向右,  $Y^o$  轴垂直向下。相应地,  $B_d-X^dY^dZ^d$ ,  $C_r-X^cY^cZ^c$  和  $O_r-X^oY^o$  分别为无人船、相机和图像在期望位姿下的坐标系。



(a) 无人船、单目相机、图像和特征点



(b) 惯性、附体、相机和图像坐标系

图 1 欠驱动无人船单目视觉伺服系统

Fig. 1 The monocular visual-servo system of underactuated USV

在  $E-XYZ$  下, 特征点的三维坐标采用  $p_i$  表示, 其中下标  $i$  表示第  $i$  个特征点。作为参考信号, 一张包含特征点的期望图像由单目相机在  $C_r-X^cY^cZ^c$  下提前拍摄得到。对应地, 实际信号由当前图像表示, 可在  $C-X^cY^cZ^c$  下实时获取。根据相机小孔成像模型<sup>[20]</sup>, 有

$$p_i^o = \frac{1}{x_i^c} T_c p_i^c, p_i^{o_r} = \frac{1}{x_i^{c_r}} T_{c_r} p_i^{c_r} \quad (3)$$

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:  $p_i^o = [x_i^o, y_i^o, 1]^T$  和  $p_i^{o_r} = [x_i^{o_r}, y_i^{o_r}, 1]^T$  分别表示  $p_i$  在  $O-X^oY^o$  和  $O_r-X^oY^o$  坐标系下的齐次投影坐标, 单位为像素, 可通过目标识别算法获得<sup>[27]</sup>;  $p_i^c = [x_i^c, y_i^c, z_i^c]^T$  和  $p_i^{c_r} = [x_i^{c_r}, y_i^{c_r}, z_i^{c_r}]^T$  分别为  $p_i$  在  $C-X^cY^cZ^c$  和  $C_r-X^cY^cZ^c$  坐标系下的位置坐标;  $T_c$  为标定的相机内部参数矩阵<sup>[28]</sup>;  $(x_c^o, y_c^o)$  为图像主点坐标;  $a_x$  和  $a_y$  为对应方向上的焦距长度。

实际上,  $p_i^c$  和  $p_i^{c_r}$  与  $p_i$  分别有如下坐标变换关系:

$$p_i^c = R^T(\psi)(p_i - p_c), p_i^{c_r} = R^T(\psi_r)(p_i - p_{c_r}) \quad (4)$$

式中:  $p_c = [x, y, -h_c]^T$  和  $p_{c_r} = [x_r, y_r, -h_c]^T$  分别为光心  $C$  和  $C_r$  在  $E-XYZ$  坐标系下的位置坐标;  $h_c$  为相机高度。另外, 根据对极几何原理<sup>[21]</sup>,  $p_i^o$  又有如下投影关系:

$$p_i^o = T_c H T_c^{-1} p_i^{o_r} \quad (5)$$

式中:  $H \in \mathbf{R}^{3 \times 3}$ , 为欧几里得单应性矩阵, 当  $i \geq 3$  时,  $H$  可以通过解算式 (5) 得到<sup>[29]</sup>。

将式 (3)~式 (5) 相结合, 可得

$$p_i - p_c = \frac{x_i^{c_r}}{x_i^c} R(\psi) H R^T(\psi_r)(p_i - p_{c_r}) \quad (6)$$

故, 单应性矩阵  $H$  可表示为

$$H = \frac{x_i^{c_r}}{x_i^c} (R(e_3) + \frac{t_{c_r}^T}{d} n_r^T) \quad (7)$$

式中:  $t_{c_r}^c = R^T(\psi)(p_{c_r} - p_c)$ , 为相机平移向量  $[e_1, e_2, 0]^T$ ;  $d = n_r^T R^T(\psi_r)(p_i - p_{c_r}) > 0$ , 为  $C_r$  到目标平面的垂直距离, 即固有未知的图像深度;  $n_r \in \mathbf{R}^3$ , 为  $C_r-X^cY^cZ^c$  坐标系下目标平面的单位法向量。

显然, 单应性矩阵  $H$  暗含有人船镇定控制误差信息  $e$ 。利用单应性分解技术<sup>[30]</sup> 分解矩阵  $H$ , 可直接得到具有尺度因子的平移误差  $(e_x, e_y)$  和旋转误差  $e_\psi$ , 即

$$e_x = \frac{e_1}{d}, e_y = \frac{e_2}{d}, e_\psi = e_3 \quad (8)$$

因此, 沿着式 (1), 式 (2) 和式 (8) 对可用误差  $e_x, e_y$  和  $e_\psi$  求导, 得到如式 (9) 所示的欠驱动无人船单目视觉伺服镇定控制系统。

$$\begin{cases} \dot{d}e_x = -u + de_y r \\ \dot{d}e_y = -v - de_x r \\ \dot{e}_\psi = -r \\ m_{11}\dot{u} = m_{22}vr - d_{11}u + \tau_u \\ m_{22}\dot{v} = -m_{11}ur - d_{22}v \\ m_{33}\dot{r} = (m_{11} - m_{22})uv - d_{33}r + \tau_r \end{cases} \quad (9)$$

为了实现无人船单目视觉伺服镇定控制, 本文作出如下假设。

**假设 1:** 无人船只安装有 1 个传感器, 即广角单目相机, 可使特征点始终处于视野之中, 故图

像深度 $d$ 和运动速度 $(u, v, r)$ 是未知的。

**假设 2:** 无人船运动特性可由经典的数学模型式 (1) 表示, 即内部未建模的动态和外部扰动可忽略不计, 其中无人船动力学模型参数 $(m_{11}, m_{22}, m_{33})$ 和 $(d_{11}, d_{22}, d_{33})$ 是未经辨识的。

**控制目标:** 在满足假设 1 和假设 2 的条件下, 仅利用单目相机测量信息 $(e_x, e_y, e_\psi)$ , 为无人船运动系统式 (1) 设计控制律 $\tau_u$ 和 $\tau_r$ , 使无人船的位姿误差 $(e_1, e_2, e_3)$ 和运动速度 $(u, v, r)$ 渐近稳定, 从而实现欠驱动无人船镇定控制, 即当 $t \rightarrow \infty$ 时,  $\eta \rightarrow \eta_d$ 。

注意, 尽管使用激光测距仪、多普勒计程仪和惯性导航单元可以直接测量图像深度 $d$ 和无人船运动速度 $(u, v, r)$ , 但搭载更多传感器必然会增加无人船的能源消耗及制造成本; 另外, 利用半经验方法、软件包和物理实验等可以辨识无人船惯性参数 $(m_{11}, m_{22}, m_{33})$ <sup>[31]</sup>, 但这种方式会花费大量人力和物力资源, 且阻尼参数 $(d_{11}, d_{22}, d_{33})$ 实际上非常难以或无法精确辨识<sup>[32]</sup>。因此, 本文针对欠驱动无人船单目视觉伺服镇定控制面临的实际问题, 给出了合理的假设 1 和假设 2。显然, 在图像深度、运动速度和模型参数均未知的前提下, 无人船单目视觉伺服系统式 (9) 具有未知的运动学和动力学动态, 导致解决欠驱动问题的坐标变换方法<sup>[7-11]</sup>不能适用。可见, 仅利用单目视觉测量信息设计一个稳定的欠驱动无人船动力学控制器渐近镇定位姿误差, 具有实际意义和理论挑战。

## 2 控制器设计与稳定性分析

### 2.1 控制器设计

除了闭环控制外, 无人船单目视觉伺服系统还不可避免地涉及到图像处理、目标辨识、图像匹配、单应性矩阵计算与分解等运算, 计算量较大。为了保证整个视觉伺服系统的实时性, 本文不采用参数自适应方法<sup>[20]</sup>在线估计图像深度, 也不设计观测器<sup>[22]</sup>重构无人船运动速度, 从而可以降低控制器复杂度, 减少运算消耗。图 2 为单目视觉伺服镇定控制系统框图。

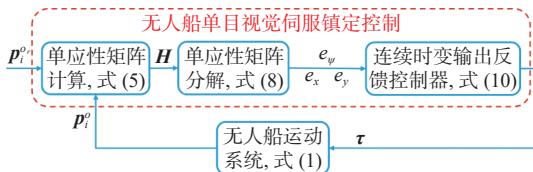


图 2 单目视觉伺服镇定控制系统框图

Fig. 2 The block diagram of monocular visual-servo stabilization control system

在无人船单目视觉伺服镇定控制系统中, 首先利用期望图像和当前图像中的投影点 $p_i^d$ 和 $p_i$ 计

算矩阵 $H$ , 然后采用单应性分解技术分解该矩阵, 直接获得视觉伺服镇定误差 $(e_x, e_y, e_\psi)$ , 最后在图像深度、运动速度、模型参数均未知的前提下, 为了使欠驱动无人船单目视觉伺服系统式 (9) 渐近稳定, 将连续时变输出反馈控制器设计为

$$\begin{cases} \tau_u = k_1 e_x \\ \tau_r = k_2 e_\psi + k_3 e_y \sin(k_4 t) \end{cases} \quad (10)$$

式中:  $0 < k_1 < \frac{dd_{11}d_{22}}{m_{11}}$ ,  $k_2 > 0$ ,  $k_3 > 0$ 和 $k_4 \neq 0$ , 均为设计调节参数。

由式 (10) 可知, 本文设计的输出反馈控制器只有 4 个调节参数, 各具物理意义, 便于调节控制性能。直观而言,  $k_1$ 为反馈增益, 决定了控制输入 $\tau_u$ 大小, 用于调节纵向误差 $e_x$ 收敛速率;  $\tau_r$ 由姿态误差 $e_\psi$ 和横向误差 $e_y$ 耦合而成;  $k_2$ 和 $k_3$ 为反馈增益。当纵向误差 $e_y$ 不为 0 时, 时变正弦函数将产生持续激励信号,  $k_4$ 用于调节激励信号周期, 以此改变无人船船摇角, 消除纵向误差 $e_x$ , 解决无人船的欠驱动问题; 当纵向误差 $e_y$ 为 0 时,  $\tau_r$ 只反馈姿态误差 $e_\psi$ , 最终将无人船船摇角镇定到期望的方向。

### 2.2 稳定性分析

**定理 1:** 考虑欠驱动无人船单目视觉伺服系统式 (9), 选择控制设计参数 $0 < k_1 < \frac{dd_{11}d_{22}}{m_{11}}$ ,  $k_2 > 0$ ,  $k_3 > 0$ 和 $k_4 \neq 0$ , 本文提出的连续时变输出反馈控制器式 (10) 能够在图像深度、无人船速度和模型参数均未知的前提下, 仅利用船载单目相机测量信息 $(e_x, e_y, e_\psi)$ 实现无人船位姿误差 $(e_1, e_2, e_3)$ 和运动速度 $(u, v, r)$ 渐近稳定。

**证明:** 系统状态 $(e_1, u, e_2, v)$ 一致有界; 系统状态 $(e_3, r)$ 一致有界; 系统状态 $(e_1, u, e_2, v, e_3, r)$ 渐近稳定。

将控制输入式 (10) 代入无人船单目视觉伺服系统式 (9), 得到闭环控制系统:

$$\dot{e}_x = -\frac{u}{d} + e_y r \quad (11)$$

$$\dot{u} = \frac{k_1 e_x}{m_{11}} - \frac{d_{11} u}{m_{11}} + \frac{m_{22} v r}{m_{11}} \quad (12)$$

$$\dot{e}_y = -\frac{v}{d} - e_x r \quad (13)$$

$$\dot{v} = -\frac{d_{22} v}{m_{22}} - \frac{m_{11} u r}{m_{22}} \quad (14)$$

$$\dot{e}_\psi = -r \quad (15)$$

$$\dot{r} = \frac{k_2 e_\psi}{m_{33}} - \frac{d_{33} r}{m_{33}} + \frac{(m_{11} - m_{22}) u v}{m_{33}} + \frac{k_3 e_y \sin(k_4 t)}{m_{33}} \quad (16)$$

1) 系统状态 $(e_1, u, e_2, v)$ 一致有界。选择两

个对称矩阵:

$$P_1 = \begin{bmatrix} d & -\frac{m_{11}}{d_{22}} \\ -\frac{m_{11}}{d_{22}} & \frac{m_{11}(d_{11} + d_{22})}{k_1 d_{22}} \end{bmatrix} \quad (17)$$

$$P_2 = \begin{bmatrix} d & -\frac{m_{22}}{d_{22}} \\ -\frac{m_{22}}{d_{22}} & \frac{m_{22}^2(d_{11} + d_{22})}{k_1 m_{11} d_{22}} \end{bmatrix} \quad (18)$$

其中,  $d > 0$ 。二者的行列式如下:

$$|P_1| = \frac{m_{11}(dd_{11}d_{22} - m_{11}k_1 + dd_{22}^2)}{k_1 d_{22}^2} > 0 \quad (19)$$

$$|P_2| = \frac{m_{22}^2(dd_{11}d_{22} - m_{11}k_1 + dd_{22}^2)}{k_1 m_{11} d_{22}^2} > 0 \quad (20)$$

由引理 1 可知,  $P_1$  和  $P_2$  为正定矩阵。利用  $P_1$  和  $P_2$  的正定性, 构造李雅普诺夫函数如下:

$$V_1 = x_1^T P_1 x_1 + x_2^T P_2 x_2 \quad (21)$$

式中:  $x_1 = [e_x, u]^T$ ;  $x_2 = [e_y, v]^T$ 。

沿着式 (11)~式 (14) 对  $V_1$  求导, 得到

$$\dot{V}_1 = -\frac{1}{d_{22}} x_1^T Q x_1 - av^2 \quad (22)$$

其中:

$$a = \frac{m_{22}(dd_{11}d_{22} - m_{11}k_1 + dd_{22}^2)}{k_1 m_{11} dd_{22}} > 0$$

$$Q = \begin{bmatrix} k_1 & -d_{11} \\ -d_{11} & \frac{dd_{11}d_{22} - m_{11}k_1 + dd_{22}^2}{k_1 d} \end{bmatrix}$$

因  $k_1 > 0$  且

$$|Q| = \frac{dd_{11}d_{22} - m_{11}k_1}{d} > 0$$

则由引理 1 可知,  $Q$  为正定矩阵。由式 (22) 可得  $\dot{V}_1 \leq 0$ , 即  $V_1(t) \leq V_1(0)$ 。当初值  $V_1(0)$  有界且系统状态  $(e_x, u, e_y, v)$  一致有界, 即  $e_x \in \mathcal{L}_\infty, u \in \mathcal{L}_\infty, e_y \in \mathcal{L}_\infty$  和  $v \in \mathcal{L}_\infty$ 。由式 (8) 可知, 系统状态  $(e_1, e_2)$  也一致有界。

2) 系统状态  $(e_3, r)$  一致有界。将系统式 (15) 和式 (16) 复写为如下向量形式:

$$\dot{x}_3 = Ax_3 + b \quad (23)$$

其中:

$$x_3 = [e_\psi, r]^T$$

$$A = \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ \frac{k_2}{m_{33}} & -\frac{d_{33}}{m_{33}} \end{bmatrix}$$

$$b = \begin{bmatrix} \frac{(m_{11} - m_{22})uv}{m_{33}} + \frac{k_3 e_y \sin(k_4 t)}{m_{33}} \\ 0 \end{bmatrix}^T$$

式中:  $x_3$  表示系统状态向量;  $A$  为增益矩阵;  $b$  可看作时变扰动。线性定常系统  $\dot{x}_3 = Ax_3$  的特征多项式为  $m_{33}s^2 + d_{33}s + k_2 = 0$ , 由引理 2 可知, 有唯一正定矩阵  $P_3 \in \mathbf{R}^{2 \times 2}$ , 使  $A^T P_3 + P_3 A = -I$  成立。

构造李雅普诺夫函数如下:

$$V_2 = x_3^T P_3 x_3 \quad (24)$$

沿着式 (23) 对函数  $V_2$  求导, 得到

$$\dot{V}_2 = -x_3^T (A^T P_3 + P_3 A) x_3 + x_3^T \delta = -x_3^T x_3 + x_3^T \delta \quad (25)$$

式中,  $\delta = 2P_3 b$ 。由式 (22) 和式 (23) 可知, 系统状态  $(e_y, u, v)$  有界, 故有一个上界值  $\bar{\delta} > 0$  且满足  $\|\delta\| \leq \bar{\delta}$ 。

利用杨氏不等式 (26), 将式 (25) 写为式 (27) 的形式:

$$x_3^T \delta \leq \theta \|x_3\|^2 + \frac{\bar{\delta}^2}{4\theta} \quad (26)$$

$$\dot{V}_2 \leq -(1 - \theta) \|x_3\|^2 + \frac{\bar{\delta}^2}{4\theta} \leq -\frac{1 - \theta}{\lambda_{\max}(P_3)} V_2 + \frac{\bar{\delta}^2}{4\theta} \quad (27)$$

式中:  $\theta \in (0, 1)$ ;  $\lambda_{\max}(P_3) > 0$ , 是正定矩阵  $P_3$  的最大特征值。不等式 (27) 表明, 当

$$V_2 > \frac{\lambda_{\max}(P_3) \bar{\delta}^2}{4\theta(1 - \theta)}, \dot{V}_2 < 0$$

系统状态  $(e_\psi, r)$  收敛到集合

$$\Omega = \left\{ V_2 \mid V_2 \leq \frac{\lambda_{\max}(P_3) \bar{\delta}^2}{4\theta(1 - \theta)} \right\}$$

则  $e_\psi \in \mathcal{L}_\infty$  和  $r \in \mathcal{L}_\infty$ 。由  $e_3 = e_\psi$  可知  $e_3$  是一致有界的。

3) 系统状态  $(e_1, u, e_2, v, e_3, r)$  渐近稳定。因系统状态  $(e_x, e_y, e_\psi, u, v, r)$  一致有界, 由式 (11)~式 (16) 可知其导数  $(\dot{e}_x, \dot{e}_y, \dot{e}_\psi, \dot{u}, \dot{v}, \dot{r})$  也是一致有界的。

由式 (22) 可得

$$\int_0^\infty v^2(s) ds \leq -\frac{1}{a} \int_0^\infty \dot{V}_1(s) ds = \frac{1}{a} (V_1(0) - V_1(\infty)) \quad (28)$$

则  $v \in \mathcal{L}_2$ , 另  $\dot{v} \in \mathcal{L}_\infty \Rightarrow v$  是一致连续的。根据引理 3, 有  $\lim_{t \rightarrow \infty} v(t) = 0$ 。同理, 根据式 (22) 不难证明  $\lim_{t \rightarrow \infty} e_x(t) = 0$  和  $\lim_{t \rightarrow \infty} u(t) = 0$ 。

结合  $e_\psi \in \mathcal{L}_\infty$  及  $\dot{e}_\psi = -\dot{r} \in \mathcal{L}_\infty \Rightarrow \dot{e}_\psi = -\dot{r}$  的一致连续性, 根据引理 4, 有  $\lim_{t \rightarrow \infty} r(t) = 0$ 。

又因  $\tau_r = k_2 e_\psi + k_3 e_y \sin(k_4 t) \in \mathcal{L}_\infty$ , 且

$$\ddot{\tau}_r = -k_2 \dot{r} - \frac{k_3}{d} \dot{v} \sin(k_4 t) - \frac{k_3 k_4}{d} v \cos(k_4 t) - k_3 \dot{e}_x r \sin(k_4 t) - k_3 e_x \dot{r} \sin(k_4 t) - k_3 k_4 e_x r \cos(k_4 t) + k_3 k_4 \dot{e}_y \cos(k_4 t) - k_3 k_4^2 \sin(k_4 t) \quad (29)$$

则  $\dot{r}_r \in \mathcal{L}_\infty \Rightarrow \dot{r}_r$  是一致连续的。根据引理 4, 有  $\lim_{t \rightarrow \infty} \dot{r}_r(t) = 0$ 。再利用  $\lim_{t \rightarrow \infty} r(t) = 0, \lim_{t \rightarrow \infty} v(t) = 0, \lim_{t \rightarrow \infty} e_x(t) = 0$ , 以及

$$\dot{r}_r = -k_2 r - \frac{k_3}{d} v \sin(k_4 t) - k_3 e_x r \sin(k_4 t) + k_3 k_4 e_y \cos(k_4 t) \quad (30)$$

可直接得到  $\lim_{t \rightarrow \infty} e_y(t) = 0$ 。因  $r \in \mathcal{L}_\infty$  且

$$\ddot{r} = -\frac{d_{33} \dot{r}}{m_{33}} + \frac{(m_{11} - m_{22}) u v}{m_{33}} + \frac{(m_{11} - m_{22}) u \dot{v}}{m_{33}} + \dot{r}_r \quad (31)$$

则  $\ddot{r} \in \mathcal{L}_\infty \Rightarrow \ddot{r}$  是一致连续的。根据引理 4 可证明  $\lim_{t \rightarrow \infty} \dot{r}(t) = 0$ 。因  $\lim_{t \rightarrow \infty} r(t) = 0, \lim_{t \rightarrow \infty} u(t) = 0, \lim_{t \rightarrow \infty} v(t) = 0$  和  $\lim_{t \rightarrow \infty} e_y(t) = 0$ , 根据式 (16) 可最终证明  $\lim_{t \rightarrow \infty} e_\psi(t) = 0$ 。

综上, 系统状态  $(e_x, u, e_y, v, e_\psi, r)$  渐近稳定。根据式 (8) 可直接证明  $(e_1, e_2, e_3)$  同样渐近稳定, 由此定理 1 得证。

### 3 仿真实验

本文以著名的 Cybership I 欠驱动无人船为模型开展仿真实验, 以验证连续时变输出反馈控制器式 (10) 的有效性。该无人船由挪威科技大学根据一艘大型供给船研制开发, 缩尺比为 1:70, 船长为 1.19 m, 重量为 17.6 kg, 其主要模型参数如表 1 所示。

表 1 Cybership I 无人船模型参数<sup>[33]</sup>

Table 1 Model parameters of the Cybership I<sup>[33]</sup>

参数	数值	参数	数值
$m_{11}$	19	$d_{11}$	4
$m_{22}$	35.2	$d_{22}$	1
$m_{33}$	4.2	$d_{33}$	10

为了建立无人船单目视觉伺服仿真场景, 在目标平面上布置 4 个特征点, 其三维空间位置分别为  $p_1 = [0.8, -1, -0.2]^T, p_2 = [0.8, 1, -0.2]^T, p_3 = [0.8, 1, -2.2]^T, p_4 = [0.8, -1, -2.2]^T$ 。相机高度设定为  $h_c = 1$ , 无人船在  $\eta_d = [0, 0, 0]^T$  位姿下提前获得期望图像, 故图像深度  $d = 0.8$ 。为了使单目相机在初始时刻能够拍摄到特征点, 无人船的初始状态设定为  $\eta(0) = [-10, -10, 1.5]^T, v(0) = [0, 0, 0]^T$ , 即无人船处于静止状态。需要说明的是, 对于无人船控制器, 上述特征点的三维空间位置、相机高度、无人船模型参数、期望位姿、初始状态均未知。在无人船单目视觉伺服镇定控制中, 首先, 利用式 (3) 生成的初始图像和期望图像, 通过识别算法可确定特征点的投影坐标  $p_i^c(0)$  和  $p_i^e$ ; 然后, 利用标定的相机内部参数  $x_c^e = y_c^e = 512$  和  $a_x = a_y = 200$  解算式 (5), 得到单应性矩阵  $H$ ; 最后, 采用单应性分解技

术分解该矩阵, 获得视觉伺服初始误差  $e_x(0) = 13.35, e_y(0) = -11.58, e_\psi(0) = -1.5$ 。由定理 1 可知, 控制器式 (10) 的增益参数需满足条件:  $0 < k_1 < \frac{d d_{11} d_{22}}{m_{11}}, k_2 > 0, k_3 > 0$  和  $k_4 \neq 0$ 。Cybership I 无人船的最大输入力和力矩分别约为 2 N 和 1.5 N·m。

综上, 将增益参数保守地设定为较小值, 即  $k_1 = k_2 = k_3 = 0.06$ , 以满足增益参数选取要求和避免控制输入饱和。另外, 为了避免过频激励, 选取激励周期为 30 s 左右, 设定  $k_4 = 0.2$ 。在仿真实验中, 通过选择广角相机减小特征目标脱离视野的风险, 则图像分辨率选取为 1 024×1 024。

仿真结果如图 3~图 7 所示。为了节省空间, 将期望图像和每一时刻的当前图像绘制在同一张图中, 形成了特征点在图像空间中的运动轨迹。随着无人船的运动, 当前图像与期望图像趋向于重合, 如图 3 所示。在视觉伺服过程中, 利用当前图像与期望图像计算欧几里得单应性矩阵, 并通过分解该矩阵获得与未知图像深度有关的位姿误差, 如图 4 所示。因此, 不需要提前标定相机外部参数或已知目标物模型信息, 从而方便了视觉伺服方法的实际应用。由于无人船运动速度未知, 本文设计了连续时变输出反馈控制器, 以降低计算复杂度, 保证整个伺服系统的运算实时性。

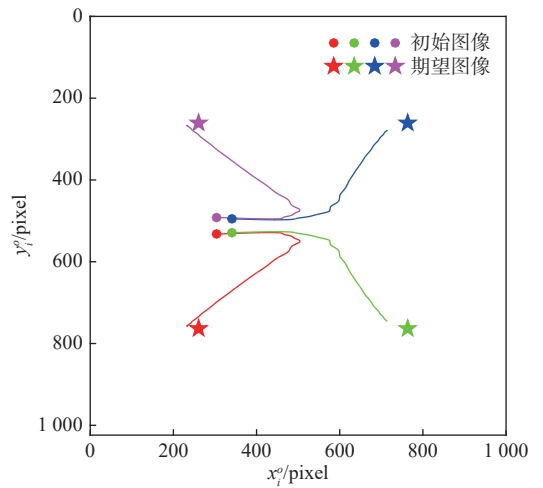


图 3 特征点在图像空间中的运动轨迹

Fig. 3 The trajectories of feature points in the image space

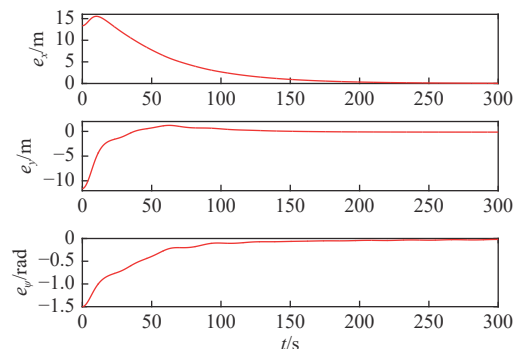


图 4 具有尺度因子的位姿误差

Fig. 4 Scaled posture errors

两个控制输入如图 5 所示, 其中连续时不变的控制输入  $\tau_u$  用于镇定纵向位置误差; 连续时变的控制输入  $\tau_r$  根据纵向位置误差产生持续激励信号, 改变无人船的艏摇角度, 减小欠驱动无人船横向位置误差。此外,  $\tau_r$  还用于调节无人船的艏摇角, 使其收敛至期望值。尽管无人船单目视觉镇定控制系统具有未知的图像深度、运动速度和模型参数, 但在控制输入的作用下, 欠驱动无人船的位姿误差依然渐近收敛到原点, 运动速度也渐近收敛到至 0, 如图 6 所示, 这与前述的稳定性分析相一致。欠驱动无人船根据船载单目相机的测量信息, 不断调整自身位置和姿态, 渐渐到达期望位姿, 总体控制效果如图 7 所示。

综上, 本文设计的连续时变输出反馈控制器能够仅利用船载单目相机的图像信息, 且在图像深度、运动速度、模型参数均未知的情况下, 克服不可积的二阶非完整约束, 实现欠驱动无人船单目视觉伺服镇定控制系统渐近稳定。

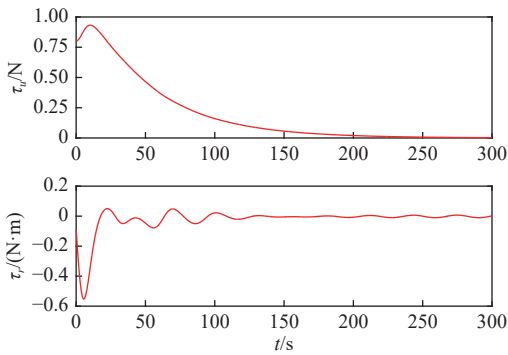


图 5 控制输入  
Fig. 5 Control inputs

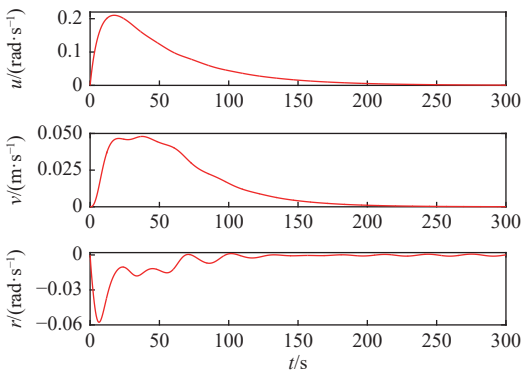


图 6 纵/横荡速度和艏摇角速率  
Fig. 6 Surge/sway velocities and yaw rate

## 4 结 论

为了解决欠驱动无人船在 GPS 拒止环境下的镇定控制问题, 本文提出了连续时变输出反馈的单目视觉伺服方法, 在图像深度、运动速度、模型参数均未知的情况下, 实现了闭环控制系统渐近稳定。具体而言, 采用单应性分解技术, 将具

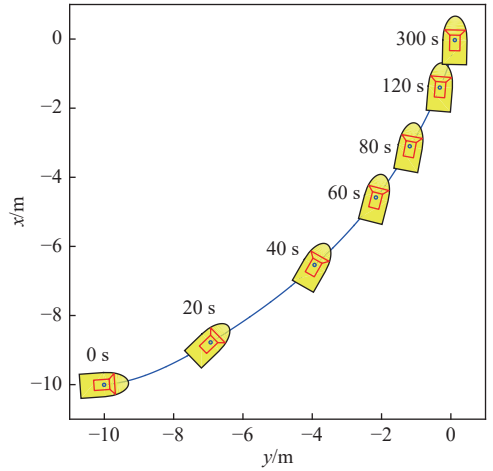


图 7 欠驱动无人船运动轨迹

Fig. 7 The trajectory of an underactuated USV

有尺度因子的位姿误差直接从当前图像和期望图像中恢复, 避免了提前标定相机外部参数和目标物模型信息的繁琐处理。为了克服无人船的欠驱动属性, 将横向位置误差和艏摇角误差相耦合, 通过引入时变周期函数设计了连续时变输出反馈控制器。值得一提的是, 系统对未知的图像深度和运动速度并未作额外的估计或观测, 这大大降低了控制器的计算复杂度。采用李雅普诺夫理论和芭芭拉引理严格证明了闭环控制系统的稳定性, 仿真结果验证了所提单目视觉伺服镇定控制方法的有效性。未来研究工作将考虑欠驱动无人船受到的外部扰动, 提高单目视觉伺服控制器的鲁棒性。

## 参考文献:

- [1] 刘祥, 叶晓明, 王泉斌, 等. 无人水面艇局部路径规划算法研究综述 [J]. *中国舰船研究*, 2021, 16(增刊 1): 1-10. LIU X, YE X M, WANG Q B, et al. Review on the research of local path planning algorithms for unmanned surface vehicles[J]. *Chinese Journal of Ship Research*, 2021, 16(Supp 1): 1-10 (in Chinese).
- [2] 欧阳子路, 王鸿东, 黄一, 等. 基于改进 RRT 算法的无人艇编队路径规划技术 [J]. *中国舰船研究*, 2020, 15(3): 18-24. OUYANG Z L, WANG H D, HUANG Y, et al. Path planning technologies for USV formation based on improved RRT[J]. *Chinese Journal of Ship Research*, 2020, 15(3): 18-24 (in Chinese).
- [3] 余亚磊, 苏荣彬, 冯旭, 等. 基于速变 LOS 的无人船反步自适应路径跟踪控制 [J]. *中国舰船研究*, 2019, 14(3): 163-171. YU Y L, SU R B, FENG X, et al. Tracking control of backstepping adaptive path of unmanned surface vessels based on surge-varying LOS[J]. *Chinese Journal of Ship Research*, 2019, 14(3): 163-171 (in Chinese).



- [4] WANG N, AHN C K. Hyperbolic-tangent LOS guidance-based finite-time path following of underactuated marine vehicles[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2020, 67(10): 8566–8575.
- [5] BROCKETT R W. Asymptotic stability and feedback stabilization[C]//*Differential Geometric Control Theory*. Boston, MA: Birkhäuser Boston, 1983: 181–191.
- [6] GHOMMAM J, MNIF F, DERBEL N. Global stabilization and tracking control of underactuated surface vessels[J]. *IET Control Theory & Applications*, 2010, 4(1): 71–88.
- [7] REYHANOGLU M. Exponential stabilization of an underactuated autonomous surface vessel[J]. *Automatica*, 1997, 33(12): 2249–2254.
- [8] GHOMMAM J, MNIF F, BENALI A, et al. Asymptotic backstepping stabilization of an underactuated surface vessel[J]. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2006, 14(6): 1150–1157.
- [9] PETERSEN K Y, FOSSEN T I. Underactuated dynamic positioning of a ship-experimental results[J]. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2000, 8(5): 856–863.
- [10] MAZENC F, PETERSEN K, NIJMEIJER H. Global uniform asymptotic stabilization of an underactuated surface vessel[J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2002, 47(10): 1759–1762.
- [11] DONG W J, GUO Y. Global time-varying stabilization of underactuated surface vessel[J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2005, 50(6): 859–864.
- [12] 董早鹏, 万磊, 李岳明, 等. 极坐标系下的欠驱动无人艇分块反步镇定控制[J]. *交通运输工程学报*, 2015, 15(4): 61–68.  
DONG Z P, WAN L, LI Y M, et al. Block backstepping stabilization control of underactuated USV in polar coordinate system[J]. *Journal of Traffic and Transportation Engineering*, 2015, 15(4): 61–68 (in Chinese).
- [13] 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).
- [14] HE H K, WANG N. Monocular visual servo of unmanned surface vehicles with view-field constraints[C]//2012 33rd Chinese Control and Decision Conference (CCDC). Kunming, China: IEEE, 2021: 973–978.
- [15] MARTINS A, ALMEIDA J M, FERREIRA H, et al. Autonomous surface vehicle docking manoeuvre with visual information[C]//*Proceedings 2007 IEEE International Conference on Robotics and Automation*. Rome, Italy: IEEE, 2007: 4994–4999.
- [16] DUNBABIN M, LANG B, WOOD B. Vision-based docking using an autonomous surface vehicle[C]//2008 IEEE International Conference on Robotics and Automation. Pasadena, CA, USA: IEEE, 2008: 26–32.
- [17] 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.
- [18] 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 on vision and position system[J]. *Computer Engineering and Design*, 2021, 42(9): 2606–2613 (in Chinese).
- [19] 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).
- [20] 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.
- [21] 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.
- [22] 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.
- [23] 邹黎敏, 胡兴凯, 伍俊良. 正定矩阵的性质及判别法[J]. *中山大学学报(自然科学版)*, 2009, 48(5): 16–23.  
ZOU L M, HU X K, WU J L. The properties and discrimination of the positive definite matrices[J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni*, 2009, 48(5): 16–23 (in Chinese).
- [24] HURWITZ A. Über algebraische gebilde mit eindeutigen transformationen in sich[J]. *Mathematische Annalen*, 1892, 41(3): 403–442.
- [25] TAO G. A simple alternative to the Barbalat lemma[J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 1997, 42(5): 698.
- [26] 闵颖颖, 刘允刚. Barbalat 引理及其在系统稳定性分析中的应用[J]. *山东大学学报(工学版)*, 2007, 37(1): 51–55, 114.  
MIN Y Y, LIU Y G. Barbalat lemma and its application in analysis of system stability[J]. *Journal of Shandong University (Engineering Science)*, 2007, 37(1): 51–55, 114 (in Chinese).

- neuro-fuzzy sliding mode based genetic algorithm control system for under water remotely operated vehicle[J]. *Expert Systems with Applications*, 2010, 37(1): 647–660.
- [7] GARCÍA-VALDOVINOS L G, SALGADO-JIMENEZ T, BANDALA-SÁNCHEZ M, et al. Modelling, design and robust control of a remotely operated underwater vehicle[J]. *International Journal of Advanced Robotic Systems*, 2014, 11(1): 10–25.
- [8] KINSEY J C, YANG Q J, HOWLAND J C. Nonlinear dynamic model-based state estimators for underwater navigation of remotely operated vehicles[J]. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2014, 22(5): 1845–1854.
- [9] 杨博, 赵旭, 苗峻, 等. 固体微推力器阵列的推力估计与分配补偿方法 [J]. *宇航学报*, 2018, 39(4): 418–425.  
YANG B, ZHAO X, MIAO J, et al. Thrust estimation and allocation compensation method of solid propellant micro-thrust array[J]. *Journal of Astronautics*, 2018, 39(4): 418–425 (in Chinese).
- [10] CORRADINI M L, MONTERIÙ A, ORLANDO G, et al. An actuator failure tolerant robust control approach for an underwater remotely operated vehicle[C]//2011 50th IEEE Conference on Decision and Control and European Control Conference. Orlando: IEEE, 2011: 3934–3939.
- [11] WANG B, ZHANG Y M. An adaptive fault-tolerant sliding mode control allocation scheme for multicopter subject to simultaneous actuator faults[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2018, 65(5): 4227–4236.
- [12] YANG K C, YUH J, SONG K C. Experimental study of fault-tolerant system design for underwater robots[C]//IEEE International Conference on Robotics & Automation. Leuven, Belgium: IEEE, 1998: 1051–1056.
- [13] CASAVOLA A, GARONE E. Fault-tolerant adaptive control allocation schemes for overactuated systems[J]. *International Journal of Robust and Nonlinear Control*, 2010, 20(17): 1958–1980.
- [14] AKRAM W, TEDESCO F, CASAVOLA A. Adaptive fault-tolerant control allocation schemes for overactuated systems with actuator and bias faults[C]//17th International Conference on Informatics in Control, Automation and Robotics. Paris, France: SciTePress, 2020: 81–88.
- [15] YE D, PARK J H, FAN Q Y. Adaptive robust actuator fault compensation for linear systems using a novel fault estimation mechanism[J]. *International Journal of Robust and Nonlinear Control*, 2016, 26(8): 1597–1614.
- [16] 杨勇. 智能水下机器人故障诊断与容错控制研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2014.  
YANG Y. Fault diagnosis and fault-tolerant control of autonomous underwater vehicle[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2014 (in Chinese).
- [17] 王小平. X 舵 AUV 控制分配优化与容错控制方法研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2019.  
WANG X P. Research on control allocation optimization and fault-tolerant control method of X-rudder AUV[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2019 (in Chinese).
- [18] FOSSEN T I. Guidance and control of ocean vehicles[M]. Hoboken: Wiley, 1994: 57–59.
- [19] NIELSEN M C, EIDSVIK O A, BLANKE M, et al. Constrained multi-body dynamics for modular underwater robots: theory and experiments[J]. *Ocean Engineering*, 2018, 149: 358–372.
- [20] DU J L, HU X, KRSTIĆ M, et al. Robust dynamic positioning of ships with disturbances under input saturation[J]. *Automatica*, 2016, 73: 207–214.



(上接第 174 页)

- [27] LOWE D G. Object recognition from local scale-invariant features[C]//Proceedings of the Seventh IEEE International Conference on Computer Vision. Kerkyra, Greece: IEEE, 1999, 2: 1150–1157.
- [28] ZHANG Z Y. Flexible camera calibration by viewing a plane from unknown orientations[C]//Proceedings of the Seventh IEEE International Conference on Computer Vision. Kerkyra, Greece: IEEE, 1999, 1: 666–673.
- [29] FANG Y C, DIXON W E, DAWSON D M, et al. Homography-based visual servo regulation of mobile robots[J]. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part B (Cybernetics)*, 2005, 35(5): 1041–1050.
- [30] FAUGERAS O D, LUSTMAN F. Motion and structure from motion in a piecewise planar environment[J]. *International Journal of Pattern Recognition and Artificial Intelligence*, 1988, 2(3): 485–508.
- [31] DO K D, PAN J. Global robust adaptive path following of underactuated ships[J]. *Automatica*, 2006, 42(10): 1713–1722.
- [32] 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*, 2018, 65(5): 4237–4246.
- [33] GHOMMAM J, MNIF F, BENALI A, et al. Observer design for Euler Lagrange systems: application to path following control of an underactuated surface vessel [C]//2007 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. San Diego, CA, USA: IEEE, 2007: 2883–2888.