

文章编号: 1001-0920(2009)03-0321-09

欠驱动水面船舶运动控制研究综述

郭 晨¹, 汪 洋¹, 孙富春^{2,1}, 沈智鹏¹

(1. 大连海事大学 信息科学技术学院, 辽宁 大连 116026;

2. 清华大学 智能技术与系统国家重点实验室, 北京 100084)

摘 要: 针对欠驱动水面船舶运动控制的发展状况, 将其归类为镇定控制、航迹跟踪和编队控制 3 个专题. 从 λ -变换法、齐次法、反步法、自动靠泊控制等方面剖析了镇定控制专题; 从输出反馈、状态反馈、输出重定义、级联方法、船舶运动数学模型等方面剖析了航迹跟踪专题中的轨迹跟踪和路径跟踪问题; 从行为控制方法、引导者跟随方法、虚拟结构方法等方面剖析了编队控制专题. 最后, 对该领域的进一步研究方向作了几点展望.

关键词: 欠驱动; 运动控制; 水面船舶; 镇定; 跟踪; 编队

中图分类号: TP27 **文献标识码:** A

Survey for motion control of underactuated surface vessels

GUO Chen¹, WANG Yang¹, SUN Fur-chun^{2,1}, SHEN Zhi-peng¹

(1. College of Information Science and Technology, Dalian Maritime University, Dalian 116026, China; 2. State Key Laboratory of Intelligent Technology and Systems, Tsinghua University, Beijing 100084, China. Correspondent: WANG Yang, E-mail: w_y_blest@126.com)

Abstract: According to the development of motion control of underactuated surface vessels (USV) in recent years, the domain is classified into three special topics, stabilization control (SC), trajectory tracking (TT) / path following (PF) and formation control (FC). Topic SC is taken apart from λ -transformation, homogeneity, backstepping and berthing control. Topics TT and PF are taken apart from output-feedback, state-feedback, output-redefined, cascade design and precision of USV's mathematical models. Topic FC is taken apart from behavior-based, leader-follower and virtual structure approaches. Finally, further research perspectives of USV are presented in detail.

Key words: Underactuated; Motion control; Surface vessels; Stabilization; Tracking; Formation

1 引 言

近年来, 欠驱动系统的控制成为人们关注的热点问题. 系统的欠驱动特性是指控制输入向量空间的维数小于其广义坐标向量空间维数的情况, 即系统的独立控制输入量少于其自由度. 典型的欠驱动系统包括: 大多数水面舰船和水下潜器, 非完整移动机器人、仿生机器人, 航空航天器 (直升机、航天飞机), 交通运输工具 (机车、吊车), 基准系统 (倒立摆、球棒系统、柔性机械臂) 等^[1-3]. 本文主要针对欠驱动水面船舶 (USV) 的运动控制问题, 讨论该领域的研究现状及其发展方向.

目前, 海上航行的大多数船舶仅装备螺旋桨主推进器和舵装置, 用以推进和操纵船舶. 部分船舶虽装有侧推器, 但仅适合在低速靠离泊时使用. 对于水

面船舶, 一般仅有调节其推进速度和操纵船舶航向两种控制方式. 船舶运动控制通常是通过对舵角的控制来实现航向控制, 而船舶位置控制是通过控制航向间接实现的. 当需要依靠舵装置产生的转船力矩和螺旋桨的纵向推进力, 同时控制船舶水平面位置和航向角 3 个自由度的运动时, 船舶控制系统便属于欠驱动系统. 这类船舶控制主要用于直接航迹控制、动力定位控制和自动靠离泊位控制等.

国际上对 USV 系统控制的研究主要采用两种途径: 三自由度全状态控制和二自由度简化状态控制. 利用 2 个独立的控制输入同时控制 3 个自由度的运动, 是学者们一直寻求解决的一个问题. USV 控制的另一种方式是通过降低输出空间自由度的个数, 使得控制问题不再具有欠驱动的特性, 从而避开

收稿日期: 2008-03-27; 修回日期: 2008-10-06.

基金项目: 国家自然科学基金项目 (60774046); 国家 973 计划前期研究项目 (2008CB417215).

作者简介: 郭晨 (1956 →), 男, 江苏如东人, 教授, 博士生导师, 从事智能控制、船舶系统控制等研究; 汪洋 (1981 →), 男, 湖北宜昌人, 博士生, 从事船舶智能化的研究.

Brockett 定理的必要条件约束,求解光滑的时不变的反馈控制方法.目前,这种控制方式主要用于跟踪控制.

研究欠驱动系统的控制问题既有理论上的重要价值,又有工程实际中的特殊意义.欠驱动系统可以较少的驱动器来完成复杂的控制任务,这不仅使控制系统结构简化,成本降低,而且降低了故障发生的概率,提高了系统的运行可靠性和易维护性.欠驱动控制可为其对应的完全驱动系统提供一种备份应急控制系统.这对于那些一旦控制器失灵便可能导致灾难性后果的系统,如在恶劣海况中航行的水面船舶和飞行器等,具有重要的意义.

鉴于 USV 运动控制系统存在的本质非线性、模型不确定性、非完整性、带约束条件、外界干扰等特性,对于这类特殊的非线性系统的研究,有助于加深对一般非线性控制问题的认识.本文主要从镇定控制、航迹跟踪和编队控制 3 个方面综述其最新研究成果.

2 镇定控制

由于各种实际任务的要求,USV 常常需要依靠自力进行保持船位和姿态的操纵、系泊操纵(包括锚泊、单点系浮和靠泊操纵).此时,船舶运动控制问题在理论上可归结为镇定控制,它主要包括定位控制和自动靠泊控制.在 USV 镇定控制中,系统位形或姿态的所有自由度都必须得到镇定,其难度相对较大.理论研究的重要性和挑战性,使得该问题成为国内外学者关注的一大焦点.

镇定控制问题的实质是寻求反馈控制律,将船舶位置和航向渐近镇定到平衡点上.当前的反馈镇定控制律主要有不连续时不变反馈控制律、时变镇定控制律、混合反馈控制律等,其中不连续时不变反馈控制器可进一步分为分段连续控制器和滑模控制器.

对于线性定常系统而言,若所有不镇定特征根均可控,则可用线性时不变反馈控制律渐近镇定.USV 控制是典型的非线性问题,如果在设定点附近线性化船舶模型,则得出的线性模型将不受控.此外,USV 具有加速度不可积分的二阶非完整约束条件,不满足著名的 Brockett 必要条件,不能转化为无漂的链式系统.USV 属于一类不能由反馈控制律 $u = (x)$ 渐近镇定的系统,这意味着镇定控制问题不能用线性 PID 控制律或任何其他线性时不变反馈控制律来解决.以研究光滑状态反馈为主的现代非线性控制方法,也不能直接用于解决 USV 的镇定控制问题,因此必须寻求新的工具和方法.当前,镇定控制问题中应用的主要方法有 变换法、齐次

法、反步法等.

2.1 变换法

变换的本质是坐标变换,即将 (x, y) 坐标在 $x = 0$ 时变为坐标 $(x, u = y/x)$.通过 变换,将非线性系统变换为等价的线性系统,只需针对该线性定常系统设计时不变反馈镇定律,再通过 反变换获得原系统的时不变反馈镇定律^[4].对于存在奇异点的情况,先用附加控制将奇异点引出,再进行上述变换,这将导致方法的不连续性.Cheng 等基于全局变换和终端滑模方法,提出了不连续控制方法,独立设计了两个子系统的渐近稳定控制律.这一控制方法同样可用于处理其他的不完整系统.

采用不连续时不变反馈方法的优点是设计简单,易得到指数收敛速率;不足之处在于控制律非连续,在工程上不易实现,算法的推广性较差.变换后系统的渐近镇定仅能保证原系统渐近镇定在平衡点的开集及紧集内,并不意味着原系统是渐近镇定的^[5].赵国良等^[6]利用系统级联的特点及 变换法,通过在系统中增加附加的收敛控制项,控制系统的整体收敛速率,获得具有指数收敛速率的时变光滑反馈镇定律.该方法同样适用于经微分同胚变换后获得的二阶系统方程组.

2.2 齐次法

与 变换法相似,齐次法也采用了“除”的概念,只是前者除的是状态,后者除的是状态的范数;前者得到的反馈控制律一般在一维流形上不光滑,而后者在原点不光滑.可控的无漂非线性仿射系统总能被一个可控的幂零齐次系统逼近,因此对原系统的设计便可转变为对该幂零齐次逼近系统的设计.一般的方法是构造使得闭环系统为零齐次度的齐次反馈,使闭环系统关于齐次范数 指数收敛.

齐次法设计控制律的关键在于如何选择扩张和范数,以便获得零齐次度的齐次反馈.一般而言,首先设定一个期望速度向量场,使 USV 按该速度向量场运动能渐近镇定到平衡点;然后以主推进力和转船力矩为控制输入,使船舶控制作用下生成的实际速度向量场指数收敛至期望的速度向量场,从而实现整个系统指数镇定.文献[7]通过坐标变换补偿模型齐性,证明了一大类欠驱动系统在连续或不连续的状态反馈控制律下不具有渐近稳定性,并证明了 USV 控制系统是局部可达和小时间局部可控的.文献[8]将渐近镇定反馈方法与齐次反馈方法相结合,提出了依靠时间的反馈控制律 $u = (x, t)$,大大加快了系统的速度,并通过船模实验验证了闭环系统能镇定在平衡点附近的一个邻域内,但在平衡点的振荡不能完全消除,它是由环境干扰等原因引

起的振荡。

2.3 反步法

齐次法的收敛率多为指数形式,但其控制律仍不光滑,而且设计过程也较复杂。反步法用于 USV 的镇定控制,能获得光滑的控制律,可保证系统渐近镇定且便于实现,因此倍受研究者的青睐。

Tian 等^[9]受 变换法的启发,通过引入一个辅助状态变量,将二阶非完整系统转化为线性时变系统,提出一种具有指数收敛速率的光滑时变反馈控制律,使闭环系统全局镇定。Soro 等^[10]基于极点配置和反步法,提出将欠驱动气垫船的位置和方向镇定到原点的时变反馈控制律,并用线性系统的李雅普诺夫方程分析了稳定性。Pettersen 等^[11]基于联合积分器和反步法,提出了连续时变反馈控制律、半全局实际镇定船舶动力学,虽然考虑了环境干扰,但仍存在稳态误差。因此有必要在控制策略中加入自适应律,以消除或减小稳态误差和振荡。Mazenc 等^[12]基于反步法,提出一种光滑时变周期状态反馈控制律,使 USV 全局一致渐近稳定到原点。Pettersen 等^[13]通过加入环境干扰和量测噪声,对水池中的海面供给船模型进行实验,评价文献[12]方法的可行性和局限性。

实验结果表明,在设计控制器进行实际应用时,应考虑船舶的未建模动态和环境干扰,驱动饱和和对纵荡暂态行为也有一定的影响。控制参数的选择具有很大的自由度,在实际应用中应力求寻找决定如何选择的最佳标准。Dong 等^[14]基于反步法,提出 3 种全局光滑时变控制律:第 1 种控制律使闭环系统的状态渐近收敛到零;第 2 种和第 3 种控制律使闭环系统的状态全局指数收敛到零。在第 3 种控制律下,能任意指定系统状态的指数收敛速率。

2.4 自动靠泊控制

船舶靠泊操纵是最复杂和最困难的操作之一,也是镇定控制的一个重要问题。实际中大型船舶靠泊往往依靠拖轮助推,在条件允许时也可进行自力操纵靠泊,尤其是中小型船舶。因此,研究 USV 的自动靠泊控制具有重要的实际意义和经济价值。

USV 自动靠泊控制的难点主要在于:船舶横向上未装备推进器,但却存在漂移运动;低速运动状态下船舶操纵性能及舵效较差;镇定过程中必须考虑运动的路径问题;船舶惯性较大,对位置和速度可控制精度要求较高。

在自动靠泊控制中,需要进行路径或轨迹设计,相对于定位控制而言,其难度更大。目前,关于 USV 运动规划的研究成果还很少。张尧等^[15]将神经网络应用于 USV 的自动靠泊控制,训练神经网络时采

用简化的方法设计系统状态变量。Kim 等^[16]提出一种基于逻辑控制的方法,驱动 USV 沿线性化的航向反复进退,逐渐接近终止状态,但其设计模型为简化模型,其实用性尚需验证。卜仁祥等^[17]研究了 USV 的非完整约束特性,在扩展状态空间定义了非线性滑模,将控制系统的轨迹设计与跟踪问题转化为标量零阶系统的镇定控制问题,完成了典型靠泊操纵的自动控制。然而,该算法只能驱动船舶前航靠泊,而且要求船舶有一定的初始进速或顶流,在轨迹设计时仅考虑了船舶的平面位置而未考虑其他状态,控制算法无法处理船舶实际操作中的螺旋桨横向分力。对于复杂的靠泊方式(如倒航或掉头)以及滑模参数的优化等问题,还有待进一步研究。

3 航迹跟踪

航迹跟踪控制是指在控制系统的驱动下,船舶从任意初始位置驶入预先规划好的航线,并沿此航线最终抵达目的地。该问题成为 USV 运动控制领域的另一主流研究方向。

根据跟踪状态偏差与时间的关系,航迹跟踪可分为轨迹跟踪(TT)和路径跟踪(PF)两大类。TT 问题要求系统在指定时间到达指定位置,PF 问题则是不考虑时间的几何位置跟踪。TT 的实现一般比 PF 困难得多,但在 USV 航速不确定的情况下,由于存在横向漂移,曲线的 PF 控制并不比 TT 控制容易实现。此外,TT 往往是针对部分变量而言,要求系统所有的变量独立跟踪各自的轨迹是不现实的。在实际航行中,大多数航迹跟踪控制都属于 PF 问题,即不关心船速或时间的问题。随着近年来海上交通运输的快速发展,船舶在交通管制区域航行、浅水域乘潮或进出港口接送引水员等情况下,也需要在指定时间到达指定位置,此时的航迹跟踪控制便属于 TT 问题。

根据航迹线的几何形状,USV 航迹跟踪控制又可分为直线航迹跟踪控制和曲线航迹跟踪控制两大类。从控制对象的角度说,二者没有本质的不同。从控制器设计的角度说,主要差别在于直线航迹跟踪控制是在平衡点附近的较小邻域内进行的镇定控制,对模型作一定的线性化处理或忽略横向漂移,在特定的条件下能满足控制要求,但曲线航迹跟踪控制需要考虑船舶的操纵运动,横向漂移已经不可忽略。目前,多数航迹跟踪控制器并不能同时满足直线和曲线航迹跟踪控制的需要。

3.1 TT 问题

在 TT 系统中,虚拟目标点按预定计划在航线上持续运动,与当前系统状态不相隶属,因此它所产生的系统状态偏差仅是依赖于时间的函数。当系统

遭受大的扰动时,其目标点的移动却不受任何影响,此时系统跟踪误差有可能超过使系统保持稳定的最低界限。欠驱动系统不能完全反馈线性化并具有不完全约束,这一问题具有挑战性。处理 USV 的 TT 问题,经典方法是局部线性化和多变量模型的解耦,运用输出反馈、状态反馈、输出重定义、级联设计等思想,使控制输入和系统自由度的数目相等,借助于标准的线性或非线性的控制方法来解决。

3.1.1 输出反馈方法

输出反馈控制既不改变系统的能控性,也不改变能观性,且在工程上易于实现。Godhavn^[18]利用反馈线性化和反步法,提出了全局指数跟踪直线和圆弧轨迹的控制器,但控制律要求船舶的前进速度恒正,仅有两个位置变量受控。由于航向角不受控,船舶将在保持期望位置时频繁转向,极端情况下有可能调转船头逆向跟踪期望位置轨迹。随后, Toussaint 等^[19]将 Godhavn 的工作推广到一般性作用力驱动下的船舶,通过选择合适的输出,扩展常规反步法修正航向偏差,以跟踪直线轨迹,也能跟踪固定偏差下的圆弧轨迹。由于受跟踪轨迹类型的限制,该方法仍存在一定的缺陷。

文献[20]利用非线性观测器提出一种输出反馈控制器,并作了实船模型仿真实验,在风、浪、流干扰下能全局最终跟踪直线轨迹。文献[21]通过坐标变换,将虚拟船舶坐标系下的跟踪误差转换为三角形,消除船舶动力学中的速度交叉项,设计全局指数速度观测器,利用位置和方向的可测量,驱使船舶跟踪直线和圆弧参考轨迹。

3.1.2 状态反馈方法

状态反馈不改变系统的能控性,但可能改变其能观性,在理论上显得更为理想。Pettersen^[22]提出了基于非线性模型的完全状态跟踪控制器,但只能全局指数稳定到期望轨迹任意小的邻域内。文献[23]基于导航原理中的瞄准线方法选择期望航向角,并将其定义为航迹偏差的函数,使航向角指数收敛。利用艏摇转矩同时控制船舶航向和横荡位移,提出了全状态反馈控制律,但该方法不能证明航迹偏差的稳定性和收敛性。Lefeber 等^[24]将跟踪误差动力学划分为两个线性子系统,利用一种简化的全状态反馈控制律,证明其补偿跟踪误差动力学全局指数稳定,并通过实船模型对算法进行验证。然而,在模型中并没有摆脱惯性矩阵、附加质量矩阵和阻尼矩阵都是对角矩阵的假设。此外,文献[23]和[24]都没有考虑环境干扰的影响。

3.1.3 输出重定义方法

文献[25]基于简化的二自由度船舶模型和滑模

控制方法,选择系统输出变量 $z = y + k$,设计了一种舵控制律,确保二自由度直线参考路径的局部渐近稳定性,但该方法中组合变量的收敛性并不能保证其中各元素的收敛性。文献[26]建立了 USV 直线航迹控制系统的非线性数学模型,基于输入输出线性化技术,采用重定义输出变量的思想,提出一种状态反馈控制律。该控制律克服了转艏角速度不能为零及重定义输出变量中组成元素的收敛性不能保证的限制,使得船舶能够渐近跟踪直线参考航迹。然而,由于船舶直线航迹控制系统是由 y , ϕ 和 r 构成的 3 维系统,当分别取 $z = f(y)$, $z = f(y, \phi)$ 和 $z = f(y, \phi, r)$ 时,重定义输出变量可有 3 种形式,在不考虑特殊情况时,系统将分别收敛到状态空间中的点、线和面。

为解决上述问题,周岗等^[27]给出了一类更一般的重定义输出变量 $z = \phi + f(y)$,并用李雅普诺夫直接法进行稳定性分析,得到了保证系统全局渐近稳定的充分条件。数字仿真和模拟实验结果均表明,所提出的充分条件能保证船舶航迹控制全局渐近稳定,设计的控制律具有较为理想的控制效果。然而,所建模型中没有考虑具有参数和外界干扰不确定项的情况,得到的控制律也较为复杂。

上述文献的共同局限性在于都忽略了 USV 的横向漂移,在外界干扰引起船舶横漂的情况下,只能保证直线航迹偏差的有界性,不能保证闭环系统的渐近稳定性,并且不能应用于曲线航迹跟踪控制。

3.1.4 级联方法

级联控制器和基于反步法的控制器的确定在于要求参考角速度不能趋于零,即要求满足持续激励 (PE) 条件。这意味着参考轨迹是一条运动轨迹,而不是由一组定点构成。文献[28]应用回归技术,解决 USV 的半全局跟踪问题。其中 PE 要求参考艏摇角速度 r_d 在任何瞬时恒正或恒负,即不能跟踪直线航迹 ($r_d = 0$)。

Do 等在这一方向上做了大量工作,并取得了显著成果^[29-31]。文献[29]在满足 PE 充分条件下,利用李雅普诺夫直接法和反步法,提出两种跟踪控制方法:一是用基于被动 $L_g V$ 型控制策略,使跟踪控制器具有良好的暂态性能和满意的渐近收敛性;二是将级联方法与反步法相结合,实现了全局指数收敛,但却影响了暂态性能。这两种方法都可直接扩展到不存在主推进力或艏摇力矩的情况。[30]引入一种能同时解决欠驱动船舶的稳定性和跟踪控制问题的通用控制器,但此处的 PE 条件却不是必要限制性的。事实上,当参考信号为正弦曲线时,一些有研究价值的情况则被排斥在外。[31]由于不要求艏摇

角速度非零,提出的控制器能跟踪直线、曲线和混合轨迹,但控制器的鲁棒性以及所提出方法扩展到输出反馈情况下的可行性还有待研究。

文献[32]首先将新的变换与计算转矩方法相结合,提出一种解耦控制器,用于将误差模型解耦为两个级联子系统;然后设计了一个包含艏摇力矩的稳定控制器,提出一种用于确保全局 λ -指数收敛的更弱的 PE 条件。其特点是只需参考纵荡速度和艏摇角速度中的一种信号来满足 PE 条件。韩冰等^[33]首先利用微分平滑理论,证明了 USV 航迹控制系统属于微分平滑系统,采用直接动态反馈线性化方法,建立模型的等价表达式,并解耦成两个可控的线性系统;然后设计反馈控制律,使 USV 在外界干扰的情况下全局渐近跟踪期望直线,解除了要求角速度持续激励的假设条件。文献[34]研究了一大类具有参考信号指数衰减的不完整动态系统的跟踪控制问题,基于时变坐标变换和级联设计方法,提出了能补偿跟踪误差动力学,使系统全局 λ -指数镇定的光滑时变控制器,不必满足参考信号持续激励或收敛到零的条件。USV 轨迹跟踪控制的仿真结果验证了其有效性。

3.2 PF 问题

在 PF 问题中,所建立的跟踪状态偏差是系统状态与参考路径之间的一种函数映射关系,它根据系统状态为其提供位于参考路径上的目标点,本身与时间并无直接关系。当系统受到意外扰动时,目标点位置与姿态能保持不变,这就使得 PF 系统具有良好的鲁棒性,能抵抗大的干扰而不至导致系统失稳。

与 TT 问题相比,PF 控制律相对简单,能使 USV 更加平滑地收敛到期望路径,控制信号也不易陷入饱和,且更易于工程实现。因此 PF 问题已成为当前又一热点研究问题。

3.2.1 数学模型的精度

USV 运动的控制器设计不仅依靠所选择的方法,而且与数学模型的精度密切相关。船舶运动数学模型的复杂性主要表现在船体粘性水动力、控制输入力/力矩、外界干扰的高度非线性和耦合性。对模型的简化会相应地忽略系统的某些重要特性。在 TT 问题中,严格要求惯性矩阵和阻尼矩阵均为对角矩阵。这一假设意味着船舶应是前后对称的,这与船舶实际结构不完全相符,因而存在建模误差。而解除这些假设会破坏模型的级联结构,进而影响控制器设计和稳定性分析。此外,TT 问题要求参考轨迹由虚拟船舶产生,这便要求该船的参数与实际船舶相同,因此很难产生参考轨迹。如何设计控制器,使

得 USV 在非对角线项和环境干扰的作用下,全局跟踪并非必须由虚拟船舶产生的参考轨迹,已成为一个亟待解决的问题。

文献[35]考虑具有非对角惯性矩阵和阻尼矩阵的三自由度船舶模型,利用输出重定义和反步法设计控制器,并给出了转换后跟踪误差的全局 λ -指数稳定性。文献[36]利用李雅普诺夫理论发展了一个全局 λ -指数稳定直线参考轨迹的控制器,但惯性矩阵和阻尼矩阵要求满足给定条件。由于横移速度和艏摇速度的测量经常受噪声的干扰,文中加入观测器,通过测量艏摇角和横向位移来估计未知状态。Peng 等^[37]提出一种基于无色卡尔曼滤波器的跟踪控制器,在线更新不确定参数的估计值,以避免由时变附加惯性矩阵引起的参数漂移,使船舶位置和航向误差收敛到原点的任意小邻域内,成功地解决了对角矩阵的问题。

当船舶模型中包含非线性阻尼项时,能够涵盖所有高低速的应用。对于实际应用的控制而言,它必须补偿环境干扰中的恒定偏差或缓慢变化的偏差,而不能与干扰中的高频成分起作用,因为这样会加速驱动器的磨损。如果船舶模型中不能包含非线性阻尼项,也就排斥了高速的应用。文献[38]针对惯性矩阵和阻尼矩阵都不是对角矩阵的船舶模型,设计了一种全局控制器,使 USV 在风、浪、流的恒定干扰下全局跟踪光滑参考路径,确保船舶以可调的前进速度保持合速度向量与参考路径相切。由于包含非线性阻尼项,并且假设主推进力和转船力矩的控制没有限制,预定路径可以是任意光滑的。如果忽略非线性阻尼项,则将对路径曲率作一些限制,否则滤波后的横移速度将不稳定。

只有同时解决上述两方面的问题,才能保证建模的精度要求。但仍存在一个问题,即船舶位置和方向通常由 DGPS 和罗经测量,而船舶航速通常不是直接测量的。船舶位置的测量易受噪声的干扰,通过位置量来获取速度量并不十分有效。对于反馈控制而言,速度量的估计非常必要。由于使用了各种观测器和滤波器,全驱动海洋运载工具的反馈控制问题已得到解决,而解决 USV 的这一问题的难度。

基于此,文献[39]解除了上述所有假设,以一艘模型船为对象进行实验,通过选择合适的随船坐标系原点,避免艏摇力矩控制量直接作用于横荡动力学模型,提出了速度不可测量时设计全局控制器的新方法,使得 USV 跟踪光滑路径。当非线性阻尼系数不能精确得知时,用一种非传统的自适应观测器和一个简化的控制器来处理。

3.2.2 其他问题

鲁棒 PF 问题在船舶工程上具有重要的现实意义. 文献[40]提出非线性鲁棒自适应控制策略, 应用 Lipschitz 连续投影算法更新未知参数的估计值, 避免了时变环境干扰造成的参数漂移不稳定性, 使 USV 以期望的速度跟踪预先设定的路径. 由于控制方法不要求参考路径由参考模型产生, 这一控制策略可直接应用于船舶靠离泊和点间导航.

因为难以根据复杂的模型确定系统的状态, 尤其是存在未知干扰的情况, 所以对于 USV 的运动控制而言, 模型的不确定性和复杂性引起的困难主要表现在系统的运动规划上. TT 方案将位置和时间的要求混合成单一的任务, 即使是在几何路径由规划器规定, 且预先完全已知的情况下也一样. 这种方法有两个明显的缺点: 一是大多数方案没有利用路径的几何信息, 以至于转归为单纯的伺服系统跟踪位置, 极大地降低了位置的暂态收敛行为; 二是若在某些原因下初始路径的时间参数化不可行, 则必然导致重新参数化, 以避免由位置误差的增长带来的系统不稳定性.

为此, 文献[41]提出一种利用路径的一切有用的几何信息的 PF 方案, 将位置和时间的要求分离为两个独立的任务, 可适用于大多数海、陆、空运载工具. 该方案首先基于非线性模型设计的控制器, 使全驱动船舶遵照指令行动; 然后通过引入横漂补偿和动态控制器状态, 将算法从全驱动船舶扩展到 USV 的控制, 并将几何跟踪路径只能是直线和曲线的问题扩展到所有的规则路径, 而不必要求弧长参数化. 通过加入参数自适应的积分动作, 可消除持续环境扰动力的作用.

4 编队控制

编队控制是指通过选取合适的控制策略, 使一组由多个同类或相似个体组成的系统保持期望的相对姿态, 维持编队队形协同运动, 以完成特定任务的控制过程. 这一问题广泛存在于多机器人、航空/航天器、水下潜器等系统^[42,43]. 相对于镇定控制和航迹跟踪两大传统领域, USV 的编队控制问题虽然起步较晚, 但由于在军事和民用领域都具有很大的应用潜力, 如舰队协同作战、大洋航行补给、自动牵引作业、环境监测、石油和天然气探测等, 且多船协作还具有容错性和适应性强等优点, USV 的编队控制问题已激起了广泛的研究兴趣.

目前, USV 的编队控制大致可分为 3 种方法: 行为控制方法、引导者跟随方法和虚拟结构方法.

4.1 行为控制方法

在行为控制方法中, 给编队中的每个个体指定

一些包括队形保持、目标搜索、障碍物避让等预期的行为, 个体的控制作用是每个行为的加权平均控制. 通过各行为的加权形成整个编队的期望行为, 而不需要个体或环境的准确模型.

文献[44]提出一种在移动机器人领域广泛应用的基于零空间的行为控制方法, 可认为是一个集中的指导系统, 将指导系统解耦为基于零空间的行为控制和操纵控制两部分. 行为控制利用一个适当的策略管理多任务, 着重考虑任务参数、环境条件和编队状况, 详细描述了编队中每条船的参考速度. 与其他方法的不同之处在于: 其单个基本行为输出组合成复杂行为的方式. 操纵控制系统用于跟踪这些参考速度, 基于船舶的运动学和动力学特性, 详细阐述各驱动器的一般作用力.

该方法的优点是在船舶具有多重竞争目标时易于得出控制律, 且在船舶之间的通信中包含了明确的反馈; 其缺点是不能明确定义编队的整体行为, 难以用精确的数学方法进行分析并确保编队的稳定性.

4.2 引导者跟随方法

在引导者跟随方法中, 指定编队中的某些船舶为引导者, 其他船舶为跟随者. 引导者跟踪事先定义好的参考轨线, 跟随者依照特定的方法, 跟踪最近邻船转换后的状态.

文献[45]将引导者跟随与滑模控制方法相结合, 设计了两种局部低级滑模控制律, 以控制编队中各船与邻船的相对位置. 由于控制律是局部的, 每条船只要求其相邻一两条船的信息已知. 考虑动力学模型参数的不确定性和波浪干扰, 使用局部信息和编队的规划总运动保证稳定性. 最后以波浪干扰下队形由矩形到三角形的变换为例进行仿真实验, 结果表明滑模控制律能确保编队的稳定性和鲁棒性. 然而, 只能证明定速曲线运动下的系统零动态稳定性, 从而限制了实际运动中的可靠选择.

该方法的优点是指定了一个单一的量, 即引导者的运动指引整个编队的行为, 易于理解和执行; 另外, 即使当引导者由于干扰引起摄动时, 仍能保持编队队形. 其缺点是没有从跟随者到引导者的明确反馈, 引导者可能成为编队的单一失败点.

4.3 虚拟结构方法

在虚拟结构方法中, 将整个编队视为一个单一刚体的虚拟结构, 各船的控制律通过定义虚拟结构的动力学, 并将虚拟结构的运动转换为各船的期望运动而得到. 编队的所有成员跟踪在期望位形空间运动的分配的节点, 并用编队反馈防止成员离开编队. 编队的每个成员跟踪一个虚拟元素, 虚拟元素的

运动由一个指定编队期望几何学的编队函数来支配, 这样便实现了虚拟结构。

文献[46]提出一种基于 PF 的虚拟结构方法, 从运动学任务和动力学任务两方面解决 USV 的编队控制问题: 前者确保每条船舶收敛到编队中的相应位置并保持路径跟踪, 后者确保船舶以指定的速度沿该路径运动。将路径参数的导数作为附加控制输入量, 用于同步编队运动, 并通过坐标变换补偿风、浪、流的环境干扰。

该方法的优点是规定整个编队的协同行为非常简单, 且编队能在操纵中很好地保持。即虚拟结构能在给定的方向下发展为一个整体, 并能多船间保持固定的几何关系。然而, 如果编队必须一直保持精确的同一虚拟结构, 尤其是编队形态为时变或需要频繁地重新装配时, 应用则会受到限制。

4.4 其他方法

文献[47]受拉格朗日力学的启发, 提出一种海洋水面船舶的编队控制方法。以一组约束函数集合的形式给出了期望的编队结构和船舶响应, 这些函数依照解析力学中的约束来处理。由约束函数产生并反馈的约束力用以保持编队组合, 这一约束力可以理解为控制律。该方法无需过多的修改, 便可应用于单一 USV 的位置控制, 且具有对于环境干扰和时延的鲁棒性。

文献[48]为 USV 的编队控制发展了一种横向轨迹控制策略, 将控制问题分解为横向轨迹控制和协同控制两个子问题。首先给定一个期望的编队模式和编队待跟踪的期望直线路径, 为每条船定义平行的期望直线路径; 然后基于使船舶收敛到其相应直线路径的 LOS 指导律, 为每条船舶设计了横向轨迹控制器; 最后用协同控制方法调整每条船的速度, 使所有船舶渐近形成期望编队并以期望速度运动。由于通信中只需每条船的一个位置变量, 且不要求所有船舶间的通信连接, 该方法极大地减少了船间通信, 适用于船间通信能力有限的编队。缺点是未考虑冲突的避免, 使得编队船舶在集结阶段有可能发生冲突。

5 未来研究方向

根据目前 USV 运动控制的发展状况, 作者认为对该领域如下方面的研究工作应予以足够的重视:

1) 考虑船舶参数不确定性和风、浪、流等外界干扰影响下的运动控制问题, 对 USV 系统鲁棒稳定、跟踪等描述和研究十分重要, 这也是富有挑战性的课题。

2) 对 USV 自动靠泊控制的研究, 目前还是一

个国际性的难题。合理规划船舶路径, 探寻新型控制算法, 以有效处理低船速、舵效差情况下的横向漂移问题, 具有重要的研究意义。

3) 在水面船舶和水下潜器进行协同作业时, 要求发展一种控制器, 使船舶在保持期望的 PF 特性的同时, 产生良好的 TT 性能, 这就涉及到 TT 和 PF 的联合控制问题。作为航迹跟踪问题的新方向, 它具有深远的发展前景。

4) 在实际应用中, 大多数激励的驱动能力都有限。考虑输入饱和的影响, 进行具有饱和和非线性状态反馈的非线性系统的分析, 是一个值得关注的方向。

5) 多数先进控制算法的约束都过多, 仅仅侧重于理论研究和仿真验证, 而未能用于船舶控制工程实践。如何设计控制律简单有效、约束条件少、计算量小、易于工程实现的 USV 控制器, 并进行海上实验, 具有重要的研究意义。

6) 由于 USV 系统不能跟踪任意的轨迹, 目前对 USV 曲线轨迹跟踪控制问题的研究还很不足。探讨合适的控制算法, 解决该方向面临的模型不确定性、未知时变海流引起的漂移、系统状态和控制输入的约束条件等问题, 也是富有挑战性的课题。

7) 由于船舶被控对象存在的严重非线性、复杂性和不确定性, 使得 USV 的运动控制具有相当的难度。因此, 探讨新型的智能控制方法以及多种方法的结合算法, 进行 USV 的运动控制, 便显得尤为重要。

8) 当前, 机器人、航天器等欠驱动系统的研究成果远比 USV 控制系统丰富。由于非线性本质相同, 将这些领域中成熟的控制方法移植应用于 USV 的运动控制, 也是今后努力的方向之一。

参考文献(References)

- [1] So-Ryeok Oh, Kaustubh Pathak, Sunil K Agrawal, et al. Approaches for a tether-guided landing of an autonomous helicopter [J]. IEEE Trans on Robotics, 2006, 22(3): 536-544.
- [2] Do K D, Pan J. Robust and adaptive path following for underactuated autonomous underwater vehicles [C]. Proc ACC. Denver, 2003: 1994-1999.
- [3] 林壮, 朱齐丹, 邢卓异. 基于遗传优化的水平欠驱动机械臂分层滑模控制[J]. 控制与决策, 2008, 23(1): 99-102.
(Lin Z, Zhu Q D, Xing Z Y. Hierarchical sliding mode control for horizontal underactuated manipulators with optimization based on GA [J]. Control and Decision, 2008, 23(1): 99-102.)
- [4] Mahmut Reyhanoglu. Control and stabilization of an

- underactuated surface vessel[C]. Proc of 35th Conf on Decision and Control. Kobe, 1996: 2371-2376.
- [5] Jin Cheng, Jianqiang Yi, Dongbin Zhao. Stabilization of an underactuated surface vessel via discontinuous control [C]. Proc ACC. New York, 2007: 206-211.
- [6] 赵国良, 韩冰. 欠驱动船舶的光滑时变指数镇定[J]. 控制理论与应用, 2006, 23(5): 787-790.
(Zhao G L, Han B. Smooth time-variant exponential stabilization for underactuated surface vessels [J]. Control Theory and Applications, 2006, 23(5): 787-790.)
- [7] Pettersen K Y, Egeland O. Exponential stabilization of an underactuated surface vessel[C]. Proc 35th Conf on Decision and Control. Kobe, 1996: 967-972.
- [8] Kristin Y Pettersen, Thor I Fossen. Underactuated dynamic positioning of a ship-experimental results[J]. IEEE Trans on Control Systems Technology, 2000, 8(5): 856-863.
- [9] Tian Yuping, Li Shihua. Exponential stabilization of nonholonomic dynamic systems by smooth time-varying control[J]. Automatica, 2002, 38(7): 1139-1146.
- [10] David Soro, Rogelio Lozano. Stabilization of an underactuated ship using a linear time-varying control [C]. Proc 41st IEEE Conf on Decision and Control. Las Vegas, 2002: 1693-1698.
- [11] Pettersen K Y, Nijmeijer H. Semi-global practical stabilization and disturbance adaptation for an underactuated ship[C]. Proc 39th Conf on Decision and Control. Sydney, 2000: 2144-2149.
- [12] Frédéric Mazenc, Kristin Pettersen, Henk Nijmeijer. Global uniform asymptotic stabilization of an underactuated surface vessel [J]. IEEE Trans on Automatic Control, 2002, 47(10): 1759-1762.
- [13] Kristin Ytterstad Pettersen, Frédéric Mazenc, Henk Nijmeijer. Global uniform asymptotic stabilization of an underactuated surface vessel: Experimental results[J]. IEEE Trans on Control Systems Technology, 2004: 12(6): 891-903.
- [14] Wenjie Dong, Yi Guo. Global time-varying stabilization of underactuated surface vessel[J]. IEEE Trans on Automatic Control, 2005, 50(6): 859-864.
- [15] Zhang Yao, Grant E H, Pratyush S. A multivariable neural controller for automatic ship berthing[J]. IEEE Control Systems, 1997, 17(4): 31-44.
- [16] Kim Tae-Han, Basar Tamer, Ha In-Joong. Asymptotic stabilization of an underactuated surface vessel via logic-based control [C]. Proc ACC. Anchorage, 2002: 4678-4683.
- [17] 卜仁祥, 刘正江, 胡江强. 欠驱动船舶非线性滑模靠泊控制器[J]. 交通运输工程学报, 2007, 7(4): 24-29.
(Bu R X, Liu Z J, Hu J Q. Berthing controller of underactuated ship with nonlinear sliding mode[J]. J of Traffic and Transportation Engineering, 2007, 7(4): 24-29.)
- [18] John Morten Godhavn. Nonlinear tracking of underactuated surface vessels[J]. Proc 35th Conf on Decision and Control. Kobe, 1996: 975-980.
- [19] Gregory J Toussaint, Tamer Basar, Francesco Bullo. Tracking for nonlinear underactuated surface vessels with generalized forces [C]. Proc IEEE Conf on Control Applications. Anchorage, 2000: 355-360.
- [20] Do K D, Jiang Z P, Pan J. Robust global output feedback stabilization of underactuated ships on a linear course[C]. Proc 41th IEEE Conf on Decision and Control. Las Vegas, 2002: 1687-1692.
- [21] Do K D, Pan J. Underactuated ship global tracking without measurement of velocities [C]. Proc ACC. Denver, 2003: 2012-2017.
- [22] Pettersen K D, Nijmeijer H. Global practical stabilization and tracking for an underactuated ship: A combined averaging and backstepping approach [C]. Proc IFAC Conf on System Structure and Control. Nantes, 1998: 59-64.
- [23] Pettersen K Y, Lefeber E. Way-point tracking control of ships [C]. Proc 40th IEEE Conf on Decision and Control. Orlando, 2001: 940-945.
- [24] Erjen Lefeber, Kristin Ytterstad Pettersen, Henk Nijmeijer. Tracking control of an underactuated ship [J]. IEEE Trans on Control Systems Technology, 2003, 11(1): 52-61.
- [25] Rongjun Zhang, Yaobin Chen, Zengqi Sun et al. Path control of a surface ship in restricted waters using sliding mode [C]. Proc IEEE Conf on Decision and Control. Tampa, 1998: 3195-3200.
- [26] 李铁山, 杨盐生, 郑云峰. 不完全驱动船舶航迹控制输入输出线性化设计[J]. 系统工程与电子技术, 2004, 26(7): 945-948.
(Li T S, Yang Y S, Zheng Y F. Input-output linearization designs for straight-line tracking control of underactuated ships [J]. Systems Engineering and Electronics, 2004, 26(7): 945-948.)
- [27] 周岗, 姚琼荟, 陈永冰, 等. 不完全驱动船舶直线航迹控制稳定性研究[J]. 自动化学报, 2007, 33(4): 378-384.
(Zhou G, Yao Q H, Chen Y B, et al. A study of stability of straight-line tracking control system for underactuated ship[J]. Acta Automatica Sinica, 2007, 33(4): 378-384.)
- [28] Pettersen K Y, Nijmeijer H. Tracking control of an underactuated surface vessel[C]. Proc 37th IEEE Conf on Decision and Control. Tampa, 1998: 4561-4566.

- [29] Zhong-Ping Jiang. Global tracking controller design for underactuated ships[C]. Proc IEEE Conf on Control Applications. Mexico City, 2001: 978-983.
- [30] Do K D, Jiang Z P, Pan J. Universal controllers for stabilization and tracking of underactuated ships[J]. Systems Control Letters, 2002, 47(4): 299-317.
- [31] Do K D, Jiang Z P, Pan J. Underactuated ship global tracking under relaxed conditions[J]. IEEE Trans on Automatic Control, 2002, 47(9): 1529-1536.
- [32] Ti-Chung Lee, Zhong-Ping Jiang. New cascade approach for global τ -exponential tracking of underactuated ships[J]. IEEE Trans on Automatic Control, 2004, 49(12): 2297-2303.
- [33] 韩冰, 赵国良. 基于微分平滑的欠驱动船舶航迹控制[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2004, 25(6): 709-713.
(Han B, Zhao G L. Path tracking control of underactuated surface vessels based on the differential flatness[J]. J of Harbin Engineering University, 2004, 25(6): 709-713.)
- [34] Cao Ke-Cai, Tian Yu-Ping. A time-varying cascaded design for trajectory tracking control of nonholonomic systems[J]. Int J of Control, 2007, 80(3): 416-429.
- [35] Do K D, Pan J. Global tracking control of underactuated ships with off-diagonal terms[C]. Proc 42nd IEEE Conf on Decision and Control. Maui, 2003: 1250-1255.
- [36] Do K D, Pan J. Global way-point tracking control of underactuated ships under relaxed assumptions[C]. Proc 42nd IEEE Conf on Decision and Control. Maui, 2003: 1244-1249.
- [37] Yan Peng, Jianda Han, Qi Song. Tracking control of underactuated surface ships: Using unscented Kalman filter to estimate the uncertain parameters[C]. Proc IEEE Conf on Mechatronics and Automation. Harbin, 2007: 1884-1889.
- [38] Do K D, Pan J. Underactuated ships follow smooth paths: Full state-feedback[C]. 43rd IEEE Conf on Decision and Control. Atlantis, 2004: 5354-5359.
- [39] Do K D, Pan J. Underactuated ships follow smooth paths with integral actions and without velocity measurements for feedback: Theory and experiments[J]. IEEE Trans on Control Systems Technology, 2006, 14(2): 308-322.
- [40] Do K D, Jiang Z P, Pan J. Robust adaptive path following of underactuated ships[C]. Proc 41th IEEE Conf on Decision and Control. Las Vegas, 2002: 3243-3248.
- [41] Morten Breivik, Thor I Fossen. Path following for marine surface vessels[C]. Proc the OTO '04. Kobe, 2004: 2282-2289.
- [42] Dongbing Gu. A differential game approach to formation control[J]. IEEE Trans on Control Systems Technology, 2008, 16(1): 85-93.
- [43] Meng Ji, Magnus Egerstedt. Distributed coordination control of multi-agent systems while preserving connectedness[J]. IEEE Trans on Robotics, 2007, 23(4): 693-703.
- [44] Filippo Arrichiello, Stefano Chiaverini, Thor I Fossen. Formation control of underactuated surface vessels using the null-space-based behavioral control[C]. Proc IEEE/RSJ Int Conf on Intelligent Robots and Systems. Beijing, 2006: 5942-5947.
- [45] Farbod Fahimi. Sliding-mode formation control for underactuated surface vessels[J]. IEEE Trans on Robotics, 2007, 23(3): 617-622.
- [46] Ghommam J, Mnif F, Poisson G, et al. Nonlinear formation control of a group of underactuated ships[C]. OCEANS 2007-Europe. Aberdeen, 2007: 1-8.
- [47] Ivar-Andre F Ihle, Jerome Jouffroy, Thor I Fossen. Formation control of marine surface craft: A Lagrangian approach[J]. IEEE J of Oceanic Engineering, 2006, 31(4): 922-934.
- [48] Even Borhaug, Alexey Pavlov, Kristin Y Pettersen. Cross-track formation control of unseractuated surface vessels[C]. Proc 45th IEEE Conf on Decision and Control. San Diego, 2006: 5955-5961.