DOI: 10.3901/JME.2020.08.216

无人船自适应路径跟踪控制系统*

柳晨光^{1,2} 初秀民¹ 毛庆洲³ 谢 朔¹

- (1. 武汉理工大学国家水运安全工程技术研究中心 武汉 430063;
2. 武汉大学测绘遥感信息工程国家重点实验室 武汉 430079;
3. 武汉大学遥感信息工程学院 武汉 430079)

摘要: 环境干扰下如何实现精确、可靠路径跟踪控制是目前无人水面船(无人船)自主航行的关键和难点问题。从无人船路径跟踪控制的算法设计、系统实现和试验验证等三个层面开展研究: 在算法设计层面, 提出了考虑水流干扰条件下的自适应视距(Line-of-sight, LOS)制导算法以及基于 LEM(Line-of-sight & extended state observer & model predictive control, 视距-扩张状态观测器-模型预测控制)的自适应路径跟踪控制方法; 在系统实现层面, 设计了无人船路径跟踪控制系统架构, 并解决了 MPC 快速求解、系统状态采集与不可测状态观测问题; 在试验验证层面, 构建了在室外水池环境下的模型船路径跟踪控制试验平台, 并在此平台上完成了 MPC 与比例-积分-微分(Proportional-integral-derivative, PID)路径跟踪控制对比试验, 以及基于 LEM 与基于传统 LOS 的 MPC 路径跟踪控制(Traditional LOS & MPC, TLM)对比试验。试验结果表明, 构建的无人船路径跟踪控制系统运行稳定可靠, 提出的 LEM 自适应路径跟踪控制方法具有更高的路径跟踪控制精度和可靠性。

关键词: 无人水面船; 路径跟踪; 自适应控制; 模型预测控制; 视距制导

中图分类号: TP273

Adaptive Path Following Control System for Unmanned Surface Vehicles

LIU Chenguang^{1,2} CHU Xiumin¹ MAO Qingzhou³ XIE Shuo¹

- (1. National Engineering Research Center for Water Transport Safety, Wuhan University of Technology, Wuhan 430063;
2. State Key Laboratory of Information Engineering in Surveying, Mapping and Remote Sensing, Wuhan University, Wuhan 430079;
3. School of Remote Sensing and Information Engineering, Wuhan University, Wuhan 430079)

Abstract: The accurate and reliable path following control under environmental disturbances is key and difficult for the autonomous navigation of unmanned surface vehicles(USV). An adaptive path following control system with three levels, i.e., algorithm design, system realization and experimental verification is studied. Specifically, on the algorithm level, an adaptive line-of-sight(LOS) navigation algorithm and an LEM(Line-of-sight & extended state observer & model predictive control) based path following control method is proposed. On the system realization level, an architecture of the proposed adaptive path following control system is designed, and the fast solving problem of MPC and the evaluation problem of unmeasured motion states are solved. On the experimental verification level, a path following control simulation platform based on a model ship is built in the outdoor pool. On the basis of this platform, the comparison experiments on the path following performance between MPC and PID(Proportional-integral-derivative) method, and between LEM and TLM(Traditional LOS & MPC) method are conducted, respectively. The experiment results show that the built platform functions well, and the proposed LEM based path following methods have higher accuracy and reliability than PID based methods.

Key words: unmanned surface vehicle; path following; adaptive control; model predictive control; line-of-sight

* 中国博士后科学基金(2018M632923)、中央高校基本科研业务费专项(203144003)和武汉市科技计划(2017010201010132)资助项目。20190403 收到初稿, 20191109 收到修改稿

0 前言

无人水面船(Unmanned surface vehicles, USV)简称无人船, 是一类特殊的水面智能机器人, 能够显著提升航运的效率、经济性和安全性。无人船控制方式通常包括远程遥控和自主航行两种^[1]。自主航行是指在无人干预情况下, 船舶能够自主完成环境感知认知、路径规划、路径跟踪等过程, 实现避碰、靠泊等复杂操作。以现阶段国内外发展来看, 无人船自主航行系统相关理论与技术仍不够成熟, 仅限于实现固定或简单场景的自主航行。无人船自主航行系统通常可分为航行感知认知子系统、决策与路径规划子系统以及运动控制子系统。其中, 运动控制子系统是, 在风、浪、流等外界干扰下, 无人船通过控制其执行机构(螺旋桨、舵等), 自动实现对已规划路径的跟踪, 使无人船能安全、可靠、准确地完成航行任务。

设计一种精确、可靠的运动控制器是实现无人船自主航行的关键。船舶在航行过程中由于受到外界环境和自身系统不确定性影响, 会导致船舶实际控制效果和预设目标不一致, 这在无人船运动控制中尤为明显。比如, 水流、风力、波浪会使无人船运动控制性能变差, 同时操纵性也会因船速、航行水深、载重量的变化而改变。一个有经验的驾驶员

可通过调整操船策略或方式来应对这种变化, 但对于自主航行的无人船, 如不能根据外界环境对运动控制进行相应调整, 则很难实现精确的航迹控制, 也增大了无人船的航行风险。同时, 考虑到大部分船舶是欠驱动方式推进的(没有侧推器), 以及船舶固有的时滞、大惯性等特点, 这进一步增加了无人船运动控制的难度。因此, 无人船运动控制一直以来受到了学者的广泛关注。船舶运动控制既包括路径或轨迹的跟踪控制, 也包括靠泊、动态定位等特殊条件下的控制。路径跟踪控制是指船舶根据预设航线(路径), 通过操控船桨和船舵, 使船舶自动完成航行过程, 是船舶运动控制的主要形式, 因此本文针对无人船路径跟踪精确控制问题开展研究。

为解决船舶路径跟踪控制问题, 早在 20 世纪 20 年代就出现了机械式的自动舵装置, 自动舵能在无人操控的情况下保持船舶航向基本不变, 后来又逐步发展为比例-积分-微分(Proportional-integral-derivative, PID)自动舵、自适应自动舵、智能舵等^[2]。此外, 最优控制、变结构控制、反馈线性化、智能控制、反步法、模型预测控制(Model predictive control, MPC)等控制方法均被应用至船舶路径跟踪控制中。为便于比较不同控制方法的优缺点, 通过查阅和总结文献, 分析几种典型无人船路径跟踪控制方法的优缺点, 如表 1 所示。

表 1 船舶路径跟踪控制方法优缺点对比

方法	主要优点	主要缺点
最优控制 ^[3-4]	① 可以处理约束; ② 目标函数具有明确的控制目标	① 对模型精度要求比较高; ② 其解析解通常比较复杂
变结构控制 ^[5-6]	① 快速响应; ② 对参数变化和扰动不灵敏	抖振问题难以消除
反馈线性化 ^[7-8]	简化了控制问题	① 非线性控制律比较复杂; ② 对模型精度要求比较高
智能控制 ^[10-11]	可处理复杂的非线性、干扰、不确定性、时变等控制问题	通常难以定义控制目标
反步法 ^[12-13]	① 能保证闭环系统的稳定性; ② 取消了系统不确定性需满足匹配条件的约束	存在 Lyapunov 函数难以设定的问题
模型预测控制 ^[14-18]	① 可显式处理多变量约束优化控制问题; ② 可处理时变或者非时变、线性或者非线性、有时滞或者无时滞的系统的约束最优控制问题	非线性优化问题求解速率较慢, 在实时控制中难以满足实时性需求

需要指出, 表 1 中提到的优缺点是针对某单一方法的一些共性特征进行总结的, 实际应用某一方法时可能会有相应的改进措施以克服这些缺点, 比如通过融合模糊神经网络和滑模控制方法实现船舶路径跟踪^[19]。

无人船运动控制系统具有时变、非线性、时滞、多约束等特征, 考虑到 MPC 具备前馈-反馈特性、自适应能力强等优点, 以及能解决其他控制方法不易解决的多变量约束问题, 如果 MPC 实时性能够

进一步得到提升, 那么 MPC 将是解决无人船路径跟踪控制问题的较优选择^[20]。MPC 在每一个采样时刻, 根据获得的当前系统状态信息, 在线求解一个有限时域开环优化问题, 并将得到的控制序列的第一个元素作用于被控对象; 在下一个采样时刻, 重复上述过程, 用新的测量值刷新优化问题并重新求解。因此, MPC 具有模型预测、滚动优化和前馈-反馈控制结构等特点。在线求解开环优化问题获得开环优化序列是模型预测控制的重要特征。近年来,

MPC 越来越多地被用于船舶运动控制领域,并取得了一些的成果。LI 等^[21]考虑舵机执行器饱和和约束和运动速率约束的条件下利用 MPC 实现了对四自由度船舶的跟踪控制。LIU 等^[22]考虑输入控制约束情况下利用基于线性矩阵不等式的非线性模型控制方法实现了欠驱动船舶的运动控制。OH 等^[17]在欠驱动船舶跟踪轨迹过程中先利用视距制导产生目标轨迹,再应用 MPC 实现对目标轨迹的跟踪。WANG 等^[23]通过将解析模型预测控制与非线性观测器相结合提出了一种鲁棒路径跟踪控制器,能使欠驱动船舶实现对参考路径的跟踪。上述基于 MPC 的船舶路径跟踪控制方法较少考虑水流等因素对无人船运动控制的影响,并且基本上是在计算机仿真环境对提出方法进行验证的,缺少对 MPC 计算实时性和未知状态观测问题的讨论。

本文针对无人船路径跟踪控制问题,提出基于自适应视距制导(Line-of-sight, LOS)、扩张状态观测器(Extended state observer, ESO)和 MPC 的自适应路径跟踪控制方法,设计并实现无人船自适应路径跟踪控制系统,并利用室外水池环境下的模型船试验平台开展无人船路径跟踪控制试验验证研究。

1 无人船自适应路径跟踪控制方法

船舶路径跟踪控制通常可分为两种情况:一种是轨迹跟踪控制,其目标轨迹(参考轨迹)是时间的函数,要求船舶在指定的时间跟踪到目标位置;另一种是路径跟随控制,仅需要船舶沿着预设航迹(几何路径)运动,在时间维度对航行过程没有要求。这两种控制方式都可以达到路径跟踪的目的,但路径跟随控制由于不需要考虑速度带来的控制约束,降低了无人船路径跟踪控制复杂度。因此本文选择路径跟随控制作为无人船路径跟踪控制方法。

1.1 运动建模

船舶运动模型一般可分为两类,一类是水动力模型,一类是响应型模型^[24]。其中,水动力模型包含了各种水动力导数和干扰系数,其参数较多,辨识复杂,一般应用于船舶运动仿真器设计和运动分析。响应型模型描述了系统输出(首向角(船首向)、首摇角速度等)对系统输入(舵角、螺旋桨转速等)的动态响应关系,相比水动力模型更为简洁,一般应用于船舶运动控制器设计和操纵性分析。因此,本文选择响应型模型作为无人船运动控制模型。响应型模型是一种单输入单输出模型,外界环境干扰对模型的影响只能通过首摇角速度 r 、首摇加速度 $\dot{r}$ 或首摇角速度的二阶导数 $\ddot{r}$ 来体现。

对于响应型模型,船首向通常定义为船舶首向(纵轴线方向)与地球正北方向的夹角,取值范围为 $0^\circ \sim 360^\circ$,跟正北方向重合时为 0° ,沿着顺时针方向依次增大。响应模型中的坐标和运动参数定义如图1所示。其中, V_c 为 NED 导航坐标系 $\{n\}$ 下的水流速度, β_c ($\dot{\beta}_c = 0$) 为水流方向角。NED 导航坐标系 $\{n\}$ 以北(N)为 x 轴,以东(E)为 y 轴,以地(D)为 z 轴。由于 USV 运动速度与地球自转速度相比很小,因此 NED 导航坐标系通常可近似为一种惯性坐标系。附体坐标系 $\{b\}$ 以无人船中心为原点,以无人船纵轴为 x 轴,以无人船横轴(右舷方向)为 y 轴。

图1 响应型模型坐标和运动参数定义

船舶运动是用前进(surge)、横漂(sway)、首摇(yaw)、起伏(heave)、横摇(roll)和纵摇(pitch)等六个自由度来描述的,为降低船舶运动控制的复杂性,通常仅需要研究船舶在水平面的运动,即仅考虑前进、横漂和首摇三个自由度^[3]。导航坐标系 $\{n\}$ 和附体坐标系 $\{b\}$ 速度矢量的转换关系为

$$\begin{pmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{\psi} \end{pmatrix} = T(\psi) \begin{pmatrix} u \\ v \\ r \end{pmatrix}$$

式中, x 、 y 、 r 分别为导航坐标系下的 x 轴位置、 y 轴位置和 z 轴旋转速度; ψ 为船首向; u 、 v 分别为附体坐标系下 x 轴速度、 y 轴速度。 $T(\psi)$ 为转移矩阵,定义如下

$$T(\psi) = \begin{pmatrix} \cos \psi & -\sin \psi & 0 \\ \sin \psi & \cos \psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (1)$$

常用的 Nomoto 响应型模型可分为线性模型和非线性模型,线性和非线性模型又都包含一阶和二阶模型。一阶和二阶 Nomoto 模型都是研究舵角小幅操纵下的模型。由于二阶 Nomoto 模型能够更好地描述船舶在高频段的动力学特性,因此本文采用二阶非线性响应模型为船舶控制模型,如式(2)所示^[25]

$$T_1 T_2 \ddot{r} + (T_1 + T_2) \dot{r} + r + \alpha r^3 = K \delta + K T_3 \dot{\delta} \quad (2)$$

式中, δ 为实际舵角; r 为首摇角速度; K 、 T 、 T_1 、 T_2 、 T_3 为操纵性指数; α 为非线性常系数。

无人船舵机一般由电气-液压操舵机构来驱动, 因此从发出舵角命令(舵令)到真实舵角达到舵令位置必定有一个延迟, 不可能实现阶跃操舵。该伺服系统的响应过程可用下列动态方程表示为^[26]

$$T_E \dot{\delta} + \delta = K_E \delta_E \quad (3)$$

式中, δ_E 为航向控制器发出的舵令; K_E 为舵机控制增益; T_E 为舵机时间常数。

联立模型式(2)、(3)可得无人船舵角响应模型

$$\begin{cases} T_1 T_2 \ddot{r} + (T_1 + T_2) \dot{r} + r + \alpha r^3 = K \delta + K T_3 \dot{\delta} \\ T_E \dot{\delta} + \delta = K_E \delta_E \end{cases} \quad (4)$$

不难看出, 舵角响应模型式(4)描述的是舵令 δ_E 与首摇角速度 r 的响应关系。

由于环境干扰(比如水流影响)和建模误差(比如船体质量左右不对中)的存在, 文献[27]会在模型式(2)中考虑压舵角 δ_r , 压舵角($\delta_r \neq 0$)的存在表明船舶需通过操舵(舵不居中或船体不对称)来保持船首向不变($\dot{\psi} = r = 0$)。通常认为压舵角 δ_r 为固定常数, 但考虑到外界干扰的不确定性, 压舵角也是一个变化的参数, 因此本文用参数 d_0 代替 δ_r 来描述环境干扰和建模误差。在考虑干扰情况下模型式(4)变为模型式(5)

$$\begin{cases} T_1 T_2 \ddot{r} + (T_1 + T_2) \dot{r} + r + \alpha r^3 = K(\delta + T_3 \dot{\delta}) + d_0 \\ T_E \dot{\delta} + \delta = K_E \delta_E \end{cases} \quad (5)$$

水流速度 V_c 不仅会对响应模型有影响, 还会导致导航坐标系中船舶航速发生改变。当 $V_c \neq 0$ 时, 则导航坐标系和附体坐标系速度向量之间的转换关系为

$$\begin{pmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{\psi} \end{pmatrix} = \mathbf{T}(\psi) \begin{pmatrix} u \\ v \\ r \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} V_c \cos \beta_c \\ V_c \sin \beta_c \\ 0 \end{pmatrix} \quad (6)$$

1.2 自适应视距制导算法

由于响应模型式(4)描述的是输入舵令与输出船首向之间的关系, 因此需要将路径跟踪控制中对路径的跟踪转换为对船首向的跟踪。视距制导具有目标跟踪精确、计算简便等优势, 在导弹拦截跟踪控制、水下航行器和船舶路径跟踪控制领域应用较广^[17]。

1.2.1 自适应接纳圆的提出

在路径跟踪中, 假定目标路径点 $P_n(x_n, y_n)$ 、 $P_{n+1}(x_{n+1}, y_{n+1})$ 和 $P_{n+2}(x_{n+2}, y_{n+2})$ 已经给出, 则目标路径为 $P_n(x_n, y_n)P_{n+1}(x_{n+1}, y_{n+1})P_{n+2}(x_{n+2}, y_{n+2})$ 。LOS 制导基本原理如图 2 所示。

图 2 视距制导算法原理

路径跟踪控制的目标是使船首向 ψ 与方向 $O_b P_{LOS}$ 保持一致。确定 LOS 点 $P_{LOS}(x_{LOS}, y_{LOS})$ 的方式为: 以 O_b 为圆心、 $R_{LOS} = nL$ ($n > 1$) (L 为船长) 为半径的圆弧与目标路径 $P_n P_{n+1}$ 交点中距离下一路径目标点 P_{n+2} 更近的一个交点作为 P_{LOS} 。计算 P_{LOS} 的公式如下

$$\begin{cases} (x_{LOS} - x_b)^2 + (y_{LOS} - y_b)^2 = R_{LOS}^2 \\ \frac{y_{LOS} - y_b}{x_{LOS} - x_b} = \frac{y_{n+1} - y_n}{x_{n+1} - x_n} \end{cases}$$

R_{LOS} 定义如下

$$R_{LOS} = \begin{cases} 3L & |e| \leq 3L \\ e + L & |e| > 3L \end{cases}$$

式中, e 为横向跟踪误差。船舶在跟踪路径 $P_n P_{n+1}$ 的过程中, 当船舶趋近目标点 P_{n+1} 时, 目标路径需要由 $P_n P_{n+1}$ 切换至 $P_{n+1} P_{n+2}$ 。通常当船舶进入以 P_{n+1} 为圆心 R_0 为半径的接纳圆内, 即 $(x_b - y_{n+1})^2 + (y_b - y_{n+1})^2 \leq R_0^2$ 时, 开始进行目标路径切换。当船舶刚进入接纳圆时, LOS 角 $\tilde{\psi}_{LOS}$ 和相对首向角 $\tilde{\psi}$ 会发生突变, 导致船舶不可避免地偏离目标路径。当相邻路径夹角 $\theta \in (0, \pi/2)$ 较小时, 船舶需要更早地转向以有充分的时间调整航向, 此时如果接纳圆半径 R_0 较小, 船舶转向会滞后, 从而导致路径跟踪控制效果变差; 相反地, 当 θ 较大时, 此时如果接纳圆半径较大, 船舶会过早跟踪下一路径, 导致对上一路径跟踪不完全。因此, 接纳圆半径 R_0 与相邻路径 θ 之间存在最优对应关系, 使得船舶路径跟踪的精度更高。

鉴于固定接纳圆半径 R_0 存在的问题, 一种可自动调整接纳圆半径 R_0 的算法被提出, 在文献[28]中对其进行了详细描述, R_0 具体可表示为

$$R_0 = \begin{cases} l \left(\frac{\pi}{\theta} - 1 \right)^2 L + R_{\min} & \forall \theta \geq \frac{\pi}{\sqrt{\frac{R_{\max} - R_{\min}}{lL}} + 1} \\ R_{\max} & \forall 0 \leq \theta < \frac{\pi}{\sqrt{\frac{R_{\max} - R_{\min}}{lL}} + 1} \end{cases} \quad (7)$$

式中, l 的值需要根据无人船操纵特性来确定^[28]。

1.2.2 考虑水流的自适应视距制导算法

当外界环境中水流干扰不能忽略时($V_c > 0$), 定义附体坐标系 $\{b\}$ 下无人船相对水流的速度为 $\mathbf{v}_r = (u_r, v_r)^T$ 。通常无人船航行横向速度 v_r 很小, 一般可忽略, 即 $v_r \approx 0$; 无人船航行纵向速度 u_r 变化较小, 可使用小扰动模型描述, 即 $u_r \approx u_0 + \Delta u$ (其中 $\Delta u \ll u_0$)。根据导航坐标系 $\{n\}$ 下的水流速度 V_c 和方向角 β_c 可以得到附体坐标系 $\{b\}$ 下的水流速度 $\mathbf{v}_c = (u_c, v_c)^T$ 为

$$\mathbf{v}_c = \begin{pmatrix} \cos\psi & \sin\psi \\ -\sin\psi & \cos\psi \end{pmatrix} \begin{pmatrix} V_c \cos\beta_c \\ V_c \sin\beta_c \end{pmatrix} \quad (8)$$

因此, 在附体坐标系下无人船航行速度为 $\mathbf{v} = (u, v)^T = (u_0 + \Delta u + u_c, v_c)^T$ 。

根据式(8), 横向跟踪误差 e 的微分方程为

$$\dot{e} = (u_0 + \Delta u + u_c) \sin\tilde{\psi} + v_c \cos\tilde{\psi} \quad (9)$$

式中, $u_c = V_c \cos(\beta_c - \psi)$, $v_c = V_c \sin(\beta_c - \psi)$ 。无人船路径跟踪控制的目标是使横向跟踪误差为 0, 也就是使一阶微分系统式(9)渐进稳定, 即 $e \rightarrow 0$ 。

LOS 角 $\tilde{\psi}_{\text{LOS}}$ 是船舶目标路径方向 $P_n P_{n+1}$ 与目标船首向方向 $O_b P_{\text{LOS}}$ 的夹角, 可由式(10)计算, 即

$$\tilde{\psi}_{\text{LOS}} = -\arcsin\left(\frac{e}{R_{\text{LOS}}}\right) \quad (10)$$

式中, $\tilde{\psi}_{\text{LOS}} \in [-\pi/2, \pi/2]$ 。

下面讨论自适应 LOS 制导算法控制律设计与稳定性分析问题。

1.2.3 自适应 LOS 制导控制律设计

针对系统式(9), $\tilde{\psi}$ 为系统输入, e 为系统输出, 控制目标为 $e \rightarrow 0$ 。考虑到水流速度会直接影响一阶系统式(9)的稳定性, 因此这里针对水流速度未知与已知两种情况分别讨论其控制律与稳定性。

(1) 水流速度未知。水流速度未知时, 为了使 $|e|$ 逐渐减小, 船舶首向角 ψ 应需要趋近 $O_b P_{\text{LOS}}$ 方向, 即需要满足 $\tilde{\psi} \rightarrow \tilde{\psi}_{\text{LOS}}$ 。当 $\tilde{\psi} = \tilde{\psi}_{\text{LOS}}$ 时, 有

$$\dot{e} = -\frac{e(u_0 + \Delta u + u_c)}{R_{\text{LOS}}} + \frac{ev_c \sqrt{R_{\text{LOS}}^2 - e^2}}{R_{\text{LOS}}} \quad (11)$$

在满足式(11)条件下, 可利用李雅普诺夫(Lyapunov)第二法来证明横向跟踪误差 e 收敛。已知 $e=0$ 为状态方程式(11)的一个平衡点, 设计李雅普诺夫函数为 $V(e) = e^2$, 结合式(9)有

$$\dot{V}(e) = 2e\dot{e} = -\frac{2e^2(u_0 + \Delta u + u_c)}{R_{\text{LOS}}} + \frac{2ev_c \sqrt{R_{\text{LOS}}^2 - e^2}}{R_{\text{LOS}}}$$

由于一般水流速度 V_c 较小且 $\Delta u \ll u_0$ ($u_0 > 0$), 因此 $|u_0 + \Delta u| \geq |u_c|$ 始终成立, 即 $u_0 + \Delta u + u_c > 0$ 始终

成立, 要使 $\dot{V}(e) \leq 0$ 成立, 则需要满足

$$-\frac{(u_0 + \Delta u + u_c)e^2}{R_{\text{LOS}}} + \frac{v_c e \sqrt{R_{\text{LOS}}^2 - e^2}}{R_{\text{LOS}}} = -\frac{e^2}{R_{\text{LOS}}} \left[(u_0 + \Delta u + u_c) - \frac{v_c \sqrt{R_{\text{LOS}}^2 - e^2}}{e} \right] \leq 0 \quad (12)$$

由式(12)可得, 只要满足条件 $|e| \geq R_{\text{LOS}} |v_c| / \sqrt{(u_0 + \Delta u + u_c)^2 + v_c^2}$, 就有 $\dot{V}(e) \leq 0$ 。当且仅当 $|e| = R_{\text{LOS}} |v_c| / \sqrt{(u_0 + \Delta u + u_c)^2 + v_c^2}$ 时, $\dot{V}(e) = 0$ 。因此, 当水流横向速度 $v_c \neq 0$ 时, e 将收敛至一个有限区域内; 当 $v_c = 0$ 时, e 将收敛到 0。综上, 当水流速度未知时, 采用 $\tilde{\psi} = \tilde{\psi}_{\text{LOS}}$ 控制律, 可使横向跟踪误差 e 有界收敛。

(2) 水流速度已知。水流速度已知时, 针对系统式(9)设计一种满足 e 渐进稳定的控制律。同样设计李雅普诺夫函数为 $V(e) = e^2$, 可得

$$\dot{V}(e) = 2e\dot{e} = 2e[(u_0 + \Delta u + u_c) \sin\tilde{\psi} + v_c \cos\tilde{\psi}] = 2e \frac{\sin(\tilde{\psi} + \eta)}{\sqrt{(u_0 + \Delta u + u_c)^2 + v_c^2}}$$

式中, $\eta = \arcsin\left(v_c / \sqrt{(u_0 + \Delta u + u_c)^2 + v_c^2}\right)$ 。由于水流速度 V_c 和 β_c 已知, u_0 、 Δu 可测, 所以 η 值可以实时计算得到。为使 $\dot{V}(e) \leq 0$ (当且仅当 $e=0$ 时 $\dot{V}(e)=0$) 始终成立, 设计如下控制律

$$\tilde{\psi} = \begin{cases} -\eta_0 - \eta & e > 0 \\ \eta_0 - \eta & e < 0 \\ 0 & e = 0 \end{cases} \quad (13)$$

式中, $\eta_0 \in (0, \pi/2]$ 为自定义常数。综上, 当水流速度已知时, 采用式(13)控制律, 使横向跟踪误差 $e \rightarrow 0$ 。

1.3 SCESO 观测器

在路径跟踪过程中, 通过自适应视距制导算法能够将船舶对路径的跟踪控制转换为对目标船首向的跟踪控制。船首向跟踪主要有以下难点: ① 当外界环境存在干扰时, 如何对干扰进行补偿, 使船首向跟踪更加准确; ② 当系统一些状态(比如首摇角速度、首摇角加速度)不可测时, 如何估计这些状态值, 为控制器提供精确反馈信息; ③ 如何提升非线性控制器的计算效率。为解决这些问题, 文献[29]提出了一种补偿扩张状态观测器(State-compensation extended state observer, SCESO), SCESO 能够同时观测系统干扰和不可测状态, 并通过补偿系统非线性项, 将 MPC 非线性控制问题转换为 MPC 线性控制问题。

SCESO 观测器详见文献[29], 其可简要描述为, 定义系统状态量为 $\mathbf{x} = (x_1, x_2, x_3, x_4)^T = (\psi, r, r, \delta)^T$, 系统输出为 $y = x_1$, 系统输入为 $u = \delta_E$ 。模型式(5)可转换为如下系统状态方程

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = x_3 \\ \dot{x}_3 = g(\mathbf{x}, u) + d(t) \\ \dot{x}_4 = \frac{1}{T_E}(u - x_4) \\ y = x_1 \end{cases} \quad (14)$$

式中

$$g(\mathbf{x}, u) = \frac{1}{T_1 T_2} \left[-x_2 - \alpha x_2^3 - (T_1 + T_2)x_3 + \frac{K(T_E - T_3)}{T_E} x_4 + \frac{K K_E T_3}{T_E} u \right]$$

于是, 系统式(14)可转换为如下单输入单输出系统的状态空间模型

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}\mathbf{x} + \mathbf{B}u + \mathbf{D}f_d(\mathbf{x}, d(t), t) \\ y = \mathbf{C}\mathbf{x} \end{cases} \quad (15)$$

式中, 系统矩阵 $\mathbf{A}$ 、 $\mathbf{B}$ 、 $\mathbf{C}$ 、 $\mathbf{D}$ 分别为

$$\mathbf{A} = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & -\frac{1}{T_1 T_2} & -\frac{T_1 + T_2}{T_1 T_2} & \frac{K(T_E - T_3)}{T_1 T_2 T_E} \\ 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{T_E} \end{pmatrix}$$

$$\mathbf{B} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & \frac{K T_3}{T_1 T_2 T_E} & \frac{1}{T_E} \end{pmatrix}^T$$

$$\mathbf{C} = (1 \quad 0 \quad 0 \quad 0) \quad \mathbf{D} = (0 \quad 0 \quad 1 \quad 0)^T$$

集总干扰 $f_d(\mathbf{x}, d(t), t) = d(t) - \alpha x_2^3 / T_1 T_2$ 。

1.4 基于 LEM 的路径自适应跟踪控制方法

基于自适应 LOS 制导算法、SCESO 观测器和 MPC 方法, 本文提出了一种新的无人船路径跟踪控制方法, 称为 LEM(LOS & SCESO & MPC)路径跟踪控制方法。假定路径跟踪过程中无人船的实时位置和船首向已知(通过 GPS 和罗经获得), 而船舶运动的角速度、角加速度和真实舵角均不可测, 则 LEM 路径跟踪控制方法可以通过估计不可测状态和未知干扰, 结合自适应 LOS 制导和 MPC 航向控制方法来实现无人船的路径跟踪控制。LEM 路径跟踪控制原理如图 3 所示, 图中详细地展示了自适应 LOS 制导算法模块、MPC 控制器模块、SCESO 观测器模块和无人船的结构关系。

模型预测控制以模型式(14)为预测模型, 以观测器式(15)为状态估计器, 在满足系统约束条件下,

通过计算系统最优输入使系统估计状态 $\hat{\mathbf{x}}$ 尽可能快地趋近于目标系统平衡与目标状态 $\mathbf{x}_0$ 。在时刻 k , 模型预测控制目标函数 $J(k)$ 定义为

$$J(k) = \sum_{i=1}^{N_p} \left\{ \|\tilde{\mathbf{x}}(k+i) - \mathbf{x}_0\|_{\mathbf{Q}}^2 + \|\tilde{u}(k+i-1)\|_{\mathbf{R}}^2 \right\} \quad (16)$$

s.t. $u_{\min} \leq \tilde{u}(k+i-1) \leq u_{\max}$

式中, $\mathbf{Q} > 0$ 和 $\mathbf{R} > 0$ 分别为权重矩阵和权重参数; $N_p = N_c$ 为预测和控制步长; $\tilde{\mathbf{x}}(k+i)$ 和 $\tilde{u}(k+i-1)$ 分别为时刻 $k+i$ 的预测状态和时刻 $k+i-1$ 的系统输入。 $u_{\min}$ 、 $u_{\max}$ 分别为控制输入下限和上限值。

图3 LEM 路径跟踪控制器原理

2 自适应路径跟踪控制系统实现

本节介绍如何构建无人船路径跟踪控制系统, 具体包括系统结构、快速 MPC 求解以及系统状态采集与观测等模块的实现。

2.1 系统结构

无人船路径跟踪控制系统结构如图 4 所示^[27]。系统由控制模块、状态采集与观测模块、执行机构和无人船船体构成。控制模块是根据目标路径点和状态计算得到舵角和螺旋桨控制指令, 执行机构执行控制指令, 状态采集与观测模块用于采集和估计系统状态, 包括位置、船首向、首摇角速度、首摇角加速度、实际舵角、干扰和船速等。

2.2 快速 MPC 求解的实现

不同于 PID、滑模控制、最优控制等这类具有显式控制律的控制方法, MPC 每次控制时都需要在线求解带约束的最优化问题以获得系统控制输入值, 尤其是计算非线性带约束最优化问题花费时间相对较长, 因此 MPC 在控制频率上受到一定的限制。虽然 MPC 在仿真时具有很好的控制效果, 但

考虑到船舶运动控制对实时性要求较高(通常控制频率需要达到 10 Hz 以上),MPC 在真实运动控制领域的应用却不是很多。由于在 Microsoft Visual Studio 平台上不自带最优化问题处理工具包,通常需要利用 Matlab、CPLEX 等第三方工具包实现最优化问题求解。Visual C++和 Matlab 联合编程实现是一种常见的实现方式,但实际测试过程中发现 Visual C++调用 Matlab 引擎的求解速率较慢,而 CPLEX 工具包在求解 MPC 最优化问题时效率较高,因此本文采用 Visual C++联合 CPLEX 来实现 MPC 算法。

图4 无人船路径跟踪控制系统结构

CPLEX 全称是 IBM ILOG CPLEX Optimization Studio, 是 IBM 研发的用于求解优化(Mathematical optimization)问题的工具包,能处理带约束的整数规划、线性规划等数学规划问题。CPLEX 既可以利用自身的 OPL(Optimization programming language)语言来编写模型,也可以使用一种叫做 Concert 的技术来实现 C++、C#与 Java 语言调用 CPLEX。基于 CPLEX 和 C++实现 MPC 的原理如图 5 所示。在 Microsoft Visual Studio 的 Visual C++平台上编写和生成上位机软件,上位机软件中 MPC 算法中最关键的优化问题是通过在 C++中定义 CPLEX 类对象进行表达的,再利用 CPLEX 的 Concert 技术调用 CPLEX 中的求解器在线求解优化问题的最优解,最后以相反的方向将最优解传至上位机软件。

2.3 系统状态采集与观测的实现

应用基于微分器的状态估计方法以实现对角加速度的观测。需要说明的是,这里的微分器也可以认为是观测器的一种,SCESO 观测器是基于微分器发展而来的。基于微分器和其他传感器采集系统状态的原理如图 6 所示。

由于非线性 MPC 求解速度较慢,本文采用线

图5 基于 CPLEX 和 C++的 MPC 实现原理

性化模型实现航向跟踪控制,系统模型如式(14)所示。为简化模型,假定式(14)中 $d(t) = d_0$ (d_0 为常值)。

图6 系统状态采集原理

3 试验验证

3.1 模型船试验平台

为验证本文提出的无人船自适应路径跟踪控制系统在真实场景下的控制效果和可靠性,在室外水池环境构建了基于模型船的路径跟踪控制系统试验平台。为满足系统需要,在模型船船体上安装了工控机(运行控制程序)、无线通信设备、锂电池、驱动电路板(执行控制命令)、电机、螺旋桨、舵机、角度传感器、差分 GPS 接收机(室外获取精确位置)、超声波传感器(避碰)、定位标志灯(室内获取精确位置)等设备,具体如图 7 所示。该模型船具备了远程控制、自主路径跟踪控制、应急避碰、实时数据查看等功能。

在室外水池环境下的试验平台如图 8 所示。远程监控计算机通过无线 WiFi 网络可以实时操控模型船并获取模型船运动状态。

图 9 为自主研发的无人船路径跟踪控制系统程序界面,具有系统和控制参数设置、系统状态和路径跟踪结果实时查看、数据保存、远程操控船舶等功能。

图7 模型船

图8 试验平台

图9 路径跟踪控制程序

3.2 实验验证

利用模型船试验平台,对本文提出的 LEM 路径跟踪方法进行试验验证。首先通过与 PID 算法对比来验证 MPC 算法在船舶路径跟踪算法中的优越性,然后通过比较 LEM 算法与基于传统 LOS 的 MPC 算法(Traditioinal LOS & MPC, TLM)来验证本文所提出 LEM 算法的有效性。TLM 算法是利用传统 LOS(固定 LOS 接纳圆半径)和 MPC 构建的一种路径跟踪控制算法。

试验过程中在室外航行的模型船会受到微风和微风引起的水流干扰。由于室外条件下的水流是随机的,无法直接测量水流速度的大小和方向。因此

采用水流速度未知时的 LOS 控制律($\tilde{\psi} = \tilde{\psi}_{\text{LOS}}$)来实现路径跟踪控制。

3.2.1 基于 MPC 与基于 PID 的路径跟踪对比试验

在室外水池环境利用模型船试验平台对比 MPC 和 PID 路径跟踪效果。

(1) 试验条件设置和试验过程。MPC 控制参数设置为: 预测时域 $N_p=8$, MPC 控制时域 $N_c=8$, 控制周期 T 为 0.1 s, 输入约束为 $-35^\circ \leq u \leq 35^\circ$, MPC 权重矩阵 Q 和 R 分别设置为 $\text{diag}([10^4, 10^4, 10^4, 10^4])$ 和 1。PID 控制参数设置为: $K_p=10$ 、 $K_i=0$ 、 $K_d=30$, 控制周期 T 为 0.1 s, 输入约束为 $-35^\circ \leq u \leq 35^\circ$ 。试验路径参数设置如表 2 所示。需要说明的是,虽然 MPC 和 PID 的目标路径点坐标稍有不同,但是路径点构成的相对路径是相同的。

表2 MPC 与 PID 试验路径参数设置

参数类型	MPC 设置值	PID 设置值
目标路径点/m	$P_1(11.32, 29.95)$,	$P_1(10.75, 27.35)$,
	$P_2(31.32, 29.95)$,	$P_2(30.75, 27.35)$,
	$P_3(31.32, 49.95)$,	$P_3(30.75, 47.35)$,
	$P_4(16.32, 49.95)$,	$P_4(15.75, 47.35)$,
	$P_5(16.32, 34.95)$	$P_5(15.75, 32.35)$
船长 L/m	1.0	1.0
LOS 半径 R_0/m	2.0	2.0
起始位置/m	(11.32, 29.95)	(10.75, 27.35)
起始船首向/ $^\circ$	70.7	96.0
起始航速/(m/s)	0	0

(2) 试验结果及分析。基于 MPC 与 PID 的路径跟踪结果分别如图 10 和 11 所示。两种方法在路径跟踪过程中的横向跟踪误差(绝对值,下同)、舵令(系统输入)、真实舵角、航速对比分别如图 12a~12d 所示。分析图 10~12 可得到以下结论。

1) 由图 10 和图 11 可见, MPC 方法跟踪的轨迹收敛更快; 由图 12a 可计算得到, 基于 MPC 的路径跟踪平均误差为 0.46 m, 基于 PID 的路径跟踪平均误差为 0.58 m。

2) 由图 12b 能看出 PID 的舵令幅度大于 MPC 的舵令幅度, 并且从图 12c 中能得到 MPC 和 PID 的真实舵角幅度分别为 12.5° 和 10.6° 。舵角幅度越小通常说明消耗的能量越小。舵令和真实舵角不完全一致由于舵机有延时特性造成的, 且真实船首向总是落后于目标船首向, 但一直在“尽力”缩小差距。

3) 图 12d 能说明 MPC 的平均航速大于 PID 的平均航速, MPC 和 PID 航速的平均值分别为 0.43 m/s 和 0.41 m/s。这是因为舵角幅度越大, 速度损失也越大, 这与结论 2) 结果吻合。

图10 基于MPC的路径跟踪结果

图11 基于PID的路径跟踪结果

(a) 跟踪误差

(b) 舵令

(c) 真实舵角

(d) 航速

图12 基于MPC和基于PID路径跟踪中状态比较

可见,在几乎相同环境条件下,MPC的路径跟踪控制效果优于PID的路径跟踪控制效果。

3.2.2 LEM与TLM路径跟踪控制对比

为验证本文提出的LEM控制算法的有效性,分别利用基于LEM和基于TLM的路径跟踪控制方法来实现无人船的路径跟踪控制。

(1) 试验条件设置和过程。LEM和TLM的MPC控制参数设置与第3.2.1节完全相同。TLM的接纳圆半径设置为 $R_0=2L$ 。LEM的接纳圆半径设置见式(7),其中 $R_{\min}=L$, $R_{\max}=9L$, $l=2.7$ 。路径参数设置如表3所示。

表3 LEM与TLM的MPC路径参数设置

参数类型	LEM 设置值	TLM 设置值
目标路径点/m	$P_1(12.69,24.03)$,	$P_1(13.30,23.65)$,
	$P_2(32.69,24.03)$,	$P_2(33.30,23.65)$,
	$P_3(49.99,34.03)$,	$P_3(50.60,33.65)$,
	$P_4(49.99,54.03)$,	$P_4(50.60,53.65)$,
	$P_5(17.99,54.03)$,	$P_5(18.60,53.65)$,
	$P_6(17.99,29.03)$	$P_6(18.60,28.65)$
船长 L /m	1.0	1.0
LOS 半径/m	$R_{P2}=R_{P3}=R_{P4}=R_{P5}=2.0$	$R_{P2}=0.6$, $R_{P3}=1.2$, $R_{P4}=3.7$, $R_{P5}=3.7$
起始位置/m	(12.69,24.03)	(13.30,23.65)
起始船首向/(°)	80.7	80.6
起始航速/(m/s)	0	0

(2) 试验结果及分析。LEM和TLM路径跟踪

结果分别如图 13 和 14 所示。从跟踪轨迹的对比容易看出, 在其他条件相同情况下, LEM 的路径跟踪控制效果明显优于 TLM 路径跟踪控制效果。两种方法在路径跟踪过程中的横向跟踪误差、舵令、真实舵角和航速的对比分别如图 15a~15d 所示。具体说明如下。

图 13 LEM 路径跟踪结果

图 14 TLM 路径跟踪结果

1) 图 15a 说明了 LEM 的横向跟踪误差小于 TLM 横向跟踪误差。其中, LEM 的平均横向跟踪误差为 0.41 m, TLM 方法平均横向跟踪误差为 0.74 m。

2) 根据图 15b、15c 呈现的舵令和真实舵角变化数据, 可计算得到 LEM 控制方法对应的真实舵角的平均值为 9.8° , TLM 方法对应的真实舵角的平均值为 14.0° 。真实舵角越大意味着花费更多的能量用于控制舵机, 因此从节能的角度来看, LEM 路径跟踪方法具有一些优势。

3) 图 15d 说明了 LEM 的航速大于 TLM 航速。其中, LEM 的平均航速为 0.44 m/s, TLM 方法平均航速为 0.40 m/s。这与 2) 中分析的结果一致, 因为通常来说舵角越大速度损耗也越大。

4) 从图 13~15 可看出, 由于 TLM 方法路径跟踪收敛较慢, 导致航行的路径总长度更长, 相同目标路径花费的时间也更多。其中, LEM 控制方法路径跟踪总时长为 244.8 s, TLM 方法路径跟踪总时长为 284.0 s。

从上述试验结果可见, LEM 在路径跟踪的精度、路径收敛速度、能耗方面都具有较明显的优势。同时, 本文基于 CPLEX 和 C++ 构建的 MPC 控制算法实时频率达到了 10 Hz, 完全能满足船舶运动控制需要。

(a) 跟踪误差

(b) 舵令

(c) 真实舵角

(d) 航速

图 15 基于 LEM 和基于 TLM 的路径跟踪状态对比

4 结论

针对无人船自主航行中的路径跟踪控制问题, 本文从算法设计、系统实现、试验验证等三个层面对无人船路径跟踪控制系统开展了研究。

(1) 提出了考虑水流干扰条件下的自适应 LOS 制导算法以及基于 LEM 的自适应路径跟踪控制方法。

(2) 设计了无人船路径跟踪控制系统架构, 解决了 MPC 快速求解和系统状态采集与不可测状态观测问题, 并构建了室外水池环境下的模型船路径跟踪控制试验平台。

(3) 模型船平台路径跟踪控制试验表明: ① 提出的无人船路径跟踪控制系统能够满足实时性和可靠性要求; ② 提出的 LEM 自适应路径跟踪控制方法具有更高的控制精度和对干扰环境更强的适应能力。

但是, 本文提出的无人船自适应路径跟踪控制系统仅在水池环境下进行了测试, 而在内河、海洋等真实复杂航行环境下的实船验证还有待开展, 在风、浪、流干扰较大时的控制效果还有待进一步研究。

参 考 文 献

- [1] 柳晨光, 初秀民, 吴青, 等. USV 发展现状及展望[J]. 中国造船, 2014, 55(4): 194-205.
LIU Chenguang, CHU Xiumin, WU Qing, et al. A review and prospect of USV research[J]. Shipbuilding of China, 2014, 55(4): 194-205.
- [2] 陈雪丽, 程启明. 船舶自动舵控制技术的发展[J]. 南京工业大学学报, 2001, 23(4): 101-105.
CHEN Xueli, CHENG Qiming. The study on development of the control techniques on ship autopilot[J]. Journal of Nanjing University of Technology, 2001, 23(4): 101-105.
- [3] 牟鹏程. 水面无人船轨迹跟踪控制方法研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2013.
MU Pengcheng. Research on control algorithm of trajectory tracking for unmanned surface vehicle[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2013.
- [4] HOLZHÖR T, SCHULTZE R. Operating experience with a high-precision track controller for commercial ships[J]. Control Engineering Practice, 1996, 4(3): 343-350.
- [5] LIU Cheng, ZOU Zaojian, YIN Jianchuan. Trajectory tracking of underactuated surface vessels based on neural network and hierarchical sliding mode[J]. Journal of Marine Science and Technology, 2014, 20(2): 322-330.
- [6] LIAO Yulei, WAN Lei, ZHUANG Jiayuan. Backstepping dynamical sliding mode control method for the path following of the underactuated surface vessel[J]. Procedia Engineering, 2011, 15: 256-263.
- [7] SASTRY S S, ISIDORI A. Adaptive control of linearizable systems[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 1989, 34(11): 1123-1131.
- [8] TZENG C Y, GOODWIN G C, CRISAFULLI S. Feedback linearization design of a ship steering autopilot with saturating and slew rate limiting actuator[J]. International Journal of Adaptive Control & Signal Processing, 2015, 13(1): 23-30.
- [9] 吴青华, 蒋林. 非线性控制理论在电力系统中应用综述[J]. 电力系统自动化, 2001, 25(3): 1-10.
Wu Qinghua, JIANG Lin. Survey on nonlinear control theory and its applications in power systems[J]. Automation of Electric Power Systems, 2001, 25(3): 1-10.
- [10] BURNS R S. The use of artificial neural networks for the intelligent optimal control of surface ships[J]. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 1995, 20(1): 65-72.
- [11] ZHANG Yao, HEARN G E, SEN P. A neural network approach to ship track-keeping control[J]. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 1996, 21(4): 513-527.
- [12] KRISTIN Y, PETTERSEN, HENK NIJMEIJER. Global practice stability and tracking for an underactuated ship—a combined averaging and backstepping approach[J]. Modeling Identification and Control, 1999, 20(4): 189-200.
- [13] PETTERSEN K Y, NIJMEIJER H. Semi-global practical stabilization and disturbance adaptation for an underactuated ship[C]//Proceedings of the 39th IEEE Conference on Decision and Control. Sydney: IEEE, 2000: 2144-2149.
- [14] 陈虹. 模型预测控制[M]. 北京: 科学出版社, 2013.
CHEN Hong. Model predictive control[M]. Beijing: Science Press, 2013.
- [15] 胡耀华, 贾欣乐. 具有约束条件的船舶运动预测控制[J]. 控制理论与应用, 2000, 17(4): 542-547.
HU Yaohua, JIA Xinle. Generalized predictive control of ships subject to state constraints[J]. Control Theory and Applications, 2000, 17(4): 542-547.
- [16] YAN Zheng, WANG Jun. Model predictive control for tracking of underactuated vessels based on recurrent neural networks[J]. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 2012, 37(4): 717-726.
- [17] OH S R, SUN Jing. Path following of underactuated marine surface vessels using line-of-sight based model predictive

- control[J]. Ocean Engineering, 2010, 37(2): 289-295.
- [18] 罗禹贡, 陈涛, 李国强. 混合动力汽车非线性模型预测巡航控制[J]. 机械工程学报, 2015, 51(16): 11-21.
LUO Yugong, CHEN Tao, LI Keqiang. Nonlinear model predictive cruise control of hybrid electric vehicle[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2015, 51(16): 11-21.
- [19] WANG Ning, 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.
- [20] 柳晨光. 基于预测控制的无人船运动控制方法研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2017.
LIU Chenguang. Motion control of unmanned surface vehicles based on model predictive control[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2017.
- [21] LI Zhen, SUN Jing, OH S. Path following for marine surface vessels with rudder and roll constraints: An MPC approach[C]//Proceedings of the 2009 American Control Conference. St. Louis: IEEE, 2009: 3611-3616.
- [22] LIU Luta, LIU Zhilin, ZHANG Jun. LMI-based model predictive control for underactuated surface vessels with input constraints[J]. Abstract and Applied Analysis, 2014: 1-9.
- [23] WANG Xiaofei, ZHANG Baohua, CHU Deying, et al. Adaptive analytic model predictive controller for path following of underactuated ships[C]//Proceedings of the 2011 Chinese Control Conference (CCC). Yantai: IEEE, 2011: 5515-5521.
- [24] 罗伟林. 基于支持向量机方法的船舶操纵运动建模研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2009.
LUO Weilin. On the modeling of ship manoeuvring motion by using support vector machines[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2009.
- [25] 贾欣乐, 杨盐生. 船舶运动数学模型: 机理建模与辨识建模[M]. 大连: 大连海事大学出版社, 1999.
JIA Xinle, YANG Yansheng. Ship motion mathematical model: Mechanism modeling and identification modeling[M]. Dalian: Dalian Maritime University Press, 1999.
- [26] VELAGIC J, VUKIC Z, OMERDIC E. Adaptive fuzzy ship autopilot for track-keeping[J]. Control Engineering Practice, 2003, 11(4): 433-443.
- [27] 张心光. 基于船舶操纵性试验分析的辨识建模研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2012.
ZHANG Xinguang. Identification modeling based on analysis of ship manoeuvring tests[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2012.
- [28] LIU Chenguang, NEGENBORN R R, CHU Xiumin, et al. Predictive path following based on adaptive line-of-sight for underactuated autonomous surface vessels[J]. Journal of Marine Science & Technology, 2018, 23(3): 483-494.
- [29] LIU Chenguang, NEGENBORN R R, ZHENG Huarong, et al. A state-compensation extended state observer for model predictive control[J]. European Journal of Control, 2017, 36: 1-9.

作者简介: 柳晨光, 男, 1988 年出生, 助理研究员。主要研究方向为船舶智能控制。

E-mail: cgliu@whu.edu.cn

初秀民(通信作者), 男, 1969 年出生, 博士, 研究员, 博士研究生导师。主要研究方向为智能水路运输。

E-mail: chuxm@whut.edu.cn