

基于模糊混合控制的自治水下机器人路径跟踪控制

马 岭¹, 崔维成²

(1. 上海交通大学 船舶海洋与建筑工程学院, 上海 200030; 2. 中国船舶科学研究中心, 江苏 无锡 214082)

摘要: 基于模糊混合控制策略, 本文提出了一种用于非线性欠驱动自治水下机器人的鲁棒路径跟踪控制方法. 利用 Sugeno 型模糊推理系统, 将 PD 滑模控制器与非奇异终端滑模控制器光滑连接, 构造了模糊混合控制器. 它能充分融合这两类控制器的优势, 无论系统远离平衡点还是在其附近, 都能取得快速收敛的效果. 如果, 借助于非时间参考量, 将该混合控制器用于自治水下机器人路径跟踪控制, 将有利于提高它在不确定环境中的跟踪能力. 最后, 通过仿真计算结果验证了该控制策略的有效性.

关键词: 路径跟踪控制; 模糊混合控制; 自治水下机器人; 终端滑模

中图分类号: TP273 **文献标识码:** A

Path following control of autonomous underwater vehicle based upon fuzzy hybrid control

MA Ling¹, CUI Wei-cheng²

(1. School of Naval Architecture and Civil Engineering, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200030, China;

2. China Ship Scientific Research Center, Wuxi Jiangsu 214082, China)

Abstract: Based upon a fuzzy hybrid control strategy, a robust path-following control method is proposed for a nonlinear and underactuated autonomous underwater vehicle. The fuzzy hybrid controller is constructed through smoothly combining a PD sliding mode controller and a non-singularity terminal sliding mode controller by using Sugeno fuzzy inference, which integrates the advantages of two controllers to obtain fast transient convergence at any distance from the equilibrium. This hybrid controller can be used for path following control of autonomous underwater vehicle with a non-time reference for improving the tracking capability of AUV in uncertain environment. The effectiveness of the proposed control strategy is verified by simulation results.

Key words: path following control; fuzzy hybrid control; autonomous underwater vehicle; terminal sliding mode

1 引言(Introduction)

对于水下机器人、潜水器及水面舰艇的运动控制而言, 路径跟踪控制具有潜在的实用价值, 正在愈来愈多地吸引着人们的注意力. 所谓路径跟踪控制是指在控制系统驱动下, 运动系统从任意初始位置驶入预先规划好的航行路径, 并沿此路径最终抵达目的地. 根据跟踪状态偏差与时间的关系, 路径跟踪问题大致可以分为两类: 一类是对时间有所依赖的, 称为 TT(trjectory tracking)问题; 另一类是对时间并无严格要求的, 称为 PF(path following)问题. 在 TT 系统中, 虚拟目标点按照预定计划在路径上持续运动, 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

统跟踪误差将可能超过使系统保持稳定的最低界限. 而在 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, 它负责根据系统状态为其提供位于参考路径上的目标点, 其本身与时间并无直接关系. 若系统受意外扰动, 目标点位置与姿态能够保持不变, 这就使得 PF 系统具有好的鲁棒性, 能够抵抗大的干扰而不至导致系统失稳. 到目前为止, 在该领域已经发表了相当数目的论文^[1~4]. 文献[1]通过圆弧及线段的连接构造了优化路径, 然后基于“后退”设计方法, 设计了欠驱动水面舰艇的跟踪控制律. 文献[2]将船舶运动方程转换到 Serret-Frenet 坐标系上, 为水面舰艇 PF 控制设计了三步后退控制律. 文献[3]将虚拟目标点沿预定轨迹运动的线速度纳入控制输入, 利用

Lyapunov 理论与后退设计方法,设计了欠驱动自治水下机器人(autonomous underwater vehicle, AUV)的 PF 控制器. 考虑有风、浪、流等外界环境扰动存在,文献[4]发展了一种鲁棒自适应 PF 控制器,用于欠驱动水面舰艇的路径跟踪控制.

终端滑模控制(terminal sliding mode control)是由 Man 等人^[5]提出,通过采用一类非线性切换面,具有确保系统状态在有限时间内到达平衡点的变结构控制技术. 针对现有 TSM 控制存在奇异性的缺陷,Feng 等人^[6]通过重新设计 TSM 切换面,提出了一种全局非奇异终端滑模(non-singular terminal sliding mode, NTSM)控制器,可用于带参数不确定和外部扰动的二阶非线性动态系统. 尽管 TSM 控制具有在有限时间内收敛和更高的稳态跟踪精度等优点,但是当系统远离平衡点时,它的控制性能却不如线性滑模控制^[7].

模糊推理系统主要有 Mamdani 和 Sugeno 等两种类型^[8]. 实际上,这两种方法在推理过程的前两个步骤(即输入变量的模糊化和模糊集合的合成运算)是别无二致的,其主要区别在于:对于 Sugeno 型模糊推理系统,推理规则后项结论中的输出变量的隶属度函数只能是关于输入变量的线性或常值函数. 因此,Sugeno 方法非常适用于作为多个传统控制器光滑内插的管理器.

考虑到普通 PD 滑模和 NTSM 滑模控制器的不同特点,本文期望通过使其二者并行结合,得到一种新的混合控制方法. 为此,采用 Sugeno 型模糊推理机实现不同滑模控制器间的光滑连接,保证控制过程平稳连续,从而达成实现控制器的优势互补与提高系统整体控制性能的目的. 借助于该模糊混合控制器,实现了 AUV 非时间参考的鲁棒路径跟踪控制,取得了良好的控制效果.

2 问题描述(Problem statement)

AUV 运动一般为空间 6 自由度,不过在弱机动时可以被解耦为水平面与垂直面的平面运动. 此处仅讨论水平面运动情况. 如图 1 所示,随动坐标系 $\{B\}$ 的原点取在 AUV 重心 G 点处,它在全局坐标系 $\{W\}$ 中的位置与姿态角可用矢量 $\eta = [\xi, \eta, \psi]^T$ 表示. 根据单刚体动力学原理,欠驱动的 AUV 运动和动力学数学模型^[9]可由强耦合的非线性微分方程组统一描述如下:

$$\begin{cases} m_u \ddot{u} = m_v r - d_u u + \tau_u, \\ m_u \ddot{v} = -m_u u r - d_v v, \\ m_r \ddot{r} = m_{uv} uv - d_r r + \tau_r, \end{cases} \quad (1)$$

和

$$\begin{cases} \dot{\xi} = \cos \psi \cdot u - \sin \psi \cdot v, \\ \dot{\eta} = \sin \psi \cdot u + \cos \psi \cdot v, \\ \dot{\psi} = r. \end{cases} \quad (2)$$

其中

$$\begin{cases} m_u = m - X_{\dot{u}}, m_v = m - Y_{\dot{v}}, \\ m_r = I_z - N_{\dot{r}}, m_{uv} = m_u - m_v, \\ d_u = -X_u - X_{|u|u}|u|, \\ d_v = -Y_v - Y_{|v|v}|v|, \\ d_r = -N_r - N_{|r|r}|r|. \end{cases} \quad (3)$$

上式中: m 是 AUV 质量; I_z 是惯性矩; $v = (u, v, r)^T$ 为速度矢量; $X_{(\cdot)}$, $Y_{(\cdot)}$ 和 $N_{(\cdot)}$ 分别为水动力系数; $\tau = (\tau_u, 0, \tau_r)^T$ 是由推力和推力矩组成的系统输入. 在上述动力学系统中,由于缺乏横向推力输入,整个系统的独立控制输入数目少于状态空间的自由度数目,此类系统被称为欠驱动系统.

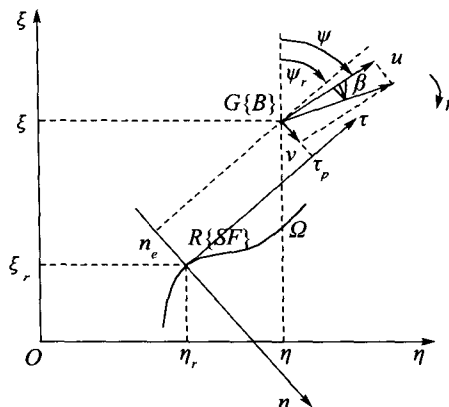


图 1 Path Following 问题描述

Fig. 1 Description of Path Following problem

考虑到在预先进行的路径规划设计中必会涉及 AUV 最小转弯半径对于参考路径的约束条件,并且控制系统的实际输入量也是有界的,因此不妨引入如下假设^[2]:

$$|v| < k \cdot |u| \quad \text{for } 0 < k < 1. \quad (4)$$

即,运动系统的横向速度 v 在路径跟踪过程中总是保持有界. 由此可以推知,AUV 的速率

$$v_t = \sqrt{u^2 + v^2} \approx |u|.$$

如图 1 所示,参考路径 Ω 是一条自由曲线, R 点是 AUV 重心 G 点在 Ω 上的投影点,也称为参考点. 以其为原点,引入由曲线切矢 τ 与法矢 n 所张成的 Serret-Frenet 坐标系 $\{SF\}$. 该坐标系以切向速度 v_t 沿参考路径 Ω 运动. 切矢 τ 与 $O\xi$ 轴的夹角 ψ_r 可视为 $\{SF\}$ 系的姿态角,并且遵守右手坐标规则. 将点 G 到参考点 R 的距离矢量投影到 $\{SF\}$ 系中,则其坐标

可表示为 $p_{sf} = [\tau_e, n_e]^T$, 它是路径跟踪的位置误差. 另外, 姿态角跟踪误差为 $\psi_e = \psi + \beta - \psi_r$. 在假设(4)的前提下, 对 p_{sf} 和 ψ_e 两端求时间导数, 则路径跟踪的位姿误差微分方程可统一写为:

$$\begin{cases} \dot{\tau}_e = -v_r(1 - k(s)n_e) + u \cos \psi_e, \\ \dot{n}_e = -v_r k(s) \cdot \tau_e + u \sin \psi_e, \\ \dot{\psi}_e = \dot{\psi} + \dot{\beta} - \dot{\psi}_r = r + \dot{\beta} - k(s) \cdot v_r. \end{cases} \quad (5)$$

其中侧滑角 $\beta = \text{atan}(v/u)$.

欠驱动 AUV 路径跟踪的目的在于, 从任意的初始位置与姿态出发, 在反馈控制输入的驱动下, 使运动系统对参考路径的跟踪位姿误差 $(\tau_e, n_e, \psi_e)^T$ 有界, 并且满足 $\lim_{t \rightarrow \infty} \|(\tau_e, n_e, \psi_e)^T\| = 0$.

3 控制器设计 (Controller design)

位置误差 p_{sf} 微分方程由式(5)第1和第2个方程所组成. 其中 u 或 v_r 都可作为该子系统的待选输入. 若选择参考点 R 的线速度 v_r 作为虚拟控制输入, 则只要 AUV 纵向运动速度 u 保持一恒定正值, 总可以通过 v_r 的控制来调节参考点 R 的位置, 最终确保位置误差 p_{sf} 趋于零.

为了描述跟踪阶段 AUV 艏向角 ψ 的瞬态运动, 有必要引入趋近角^[10]

$$\delta(n_e, u) = -\arctan(n_e u), \quad (6)$$

使得对于任意的 n_e 和 u 值, 都有 $n_e \sin(\delta(n_e, u)) \leq 0$ 成立, 当且仅当 $n_e \cdot u = 0$ 时, 上式等号成立.

观察位姿误差微分方程(5), 发现只要 τ_e 收敛到零, 且姿态误差 ψ_e 也同时收敛到 δ , 则 n_e 自然收敛到零. 若 n_e 收敛到零, 则由其定义可知, 趋近角 δ 也收敛到零. 因此整个路径跟踪控制系统可划分为3个子系统——速度、位置与方向系统, 分别进行控制器设计. 速度控制器的目的是使得 AUV 纵向速度 u 在整个跟踪过程保持于一恒大于零的定值 u_d , 且满足 $|v| \ll u_d$ 的假设条件. 在 AUV 纵向速度恒定的情况下, 通过为参考点 R 切向速度 v_r 设计控制律, 使得位置误差 p_{sf} 趋于零; 与此同时, 在方向控制律作用下, 姿态误差 ψ_e 收敛至趋近角 δ , 最终实现路径跟踪目标.

3.1 速度和位置子系统控制器设计 (Controllers design for speed and position subsystems)

速度子系统是一个独立的系统, 控制输入为推力 τ_u . 对于式(1)第1个方程和预定的巡航速度 $u_d > 0$ 和 $\dot{u}_d = 0$, 不难为 AUV 的纵轴向推力 τ_u 设计出如下控制律

$$\tau_u = -m_u(K_1 \tilde{u} + K_2 \text{sgn} \tilde{u}) - m_v v r + d_u u. \quad (6)$$

其中: K_1 和 $K_2 > 0$ 为控制器增益; 控制误差变量为 $\tilde{u} = u - u_d$.

位置子系统由式(5)的第1和第2个方程所组成, 系统状态为 (τ_e, n_e) , 控制输入为虚拟参考点 R 的切向速度 v_r . 考虑 Lyapunov 正定函数

$$V = \frac{1}{2} \cdot (\tau_e^2 + n_e^2). \quad (7)$$

在上式两端对时间求导, 带入式(5)的第1和第2个方程后, 可得

$$\begin{aligned} \dot{V} &= \tau_e \dot{\tau}_e + n_e \dot{n}_e = \\ &= \tau_e(-v_r + k(s)v_r n_e + u \cos \psi_e) + \\ &= n_e(-k(s)v_r \tau_e + u \sin \psi_e) = \\ &= \tau_e(-v_r + u \cos \psi_e) + n_e u \sin \psi_e. \end{aligned} \quad (8)$$

显然, 不难选取满足稳定性条件的控制律

$$v_r = u \cos \psi_e + K_3 \tau_e + K_4 \text{sgn} \tau_e. \quad (9)$$

其中控制器增益 $K_3, K_4 > 0$. 考虑到在速度控制律(6)作用下有 $u = u_d$, 且姿态误差 ψ_e 等于趋近角 δ , 若将控制律(9)带入式(8), 易知

$$\begin{aligned} \dot{V} &= -K_3 \tau_e^2 - K_4 \tau_e \text{sgn} \tau_e + n_e u_d \sin \delta = \\ &= -K_3 \tau_e^2 - K_4 |\tau_e| - \frac{(n_e u_d)^2}{\sqrt{1 + (n_e u_d)^2}} \leq 0. \end{aligned} \quad (10)$$

在上式中, 当且仅当 $\tau_e = n_e = 0$ 时, 等式成立. 因此, 只要轴向速度 u 保持大于零的定值, 且 ψ_e 收敛至趋近角 δ , 则在反馈控制律(9)作用下, 跟踪位置误差 $p_{sf} = (\tau_e, n_e)^T$ 总可趋近于零.

3.2 方向子系统的控制器设计 (Controller design for orientation subsystem)

方向子系统由式(1)第1个方程和式(5)第3个方程共同构成, 是关于姿态角的复杂的二阶非线性系统, 其控制输入为转艏力矩 τ_r .

如下图2所示, 本文通过 Sugeno 型模糊推理系统实现了普通 PD 滑模和 NTSM 滑模的模糊混合控制, 使得两种滑模控制器能够优势互补, 从而促使整个控制系统的性能得以提高.

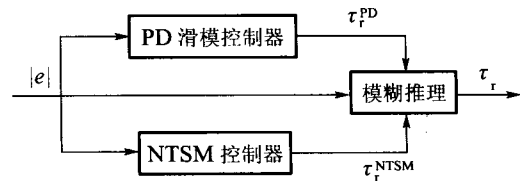


图2 τ_r 的模糊混合控制器

Fig. 2 Fuzzy hybrid controller of τ_r

3.2.1 PD 滑模控制器 (PD sliding mode controller)

一般而言, 滑模控制设计可分为两步, 即滑模切换面的选择与反馈控制律的设计. 下面首先选取线

性的 PD 型滑模

$$s_1 = K_{d1}\dot{s} + e. \quad (11)$$

其中: $e = \psi_e - \delta$; $K_{d1} > 0$. 对于理想滑模运动, 即 $s_1 = 0$, 在其两边对时间求导, 可得

$$\dot{s}_1 = K_{d1}\ddot{e} + \dot{s} = 0. \quad (12)$$

根据等效控制方法, 易得

$$\tau_{\text{req}}^{\text{PD}} = -m_r \left(\frac{1}{K_{d1}} \dot{s} + \ddot{\beta} - \ddot{\psi}_r - \ddot{\delta} \right) - m_w uv + d_r r.$$

基于指数趋近律, 选取如下滑模存在条件

$$s_1 \dot{s}_1 \leq -K_5 s_1 - K_6 |s_1|. \quad (13)$$

其中 $K_5, K_6 > 0$. 从而, 不难得到 PD 滑模控制律

$$\begin{aligned} \tau_r^{\text{PD}} = & \tau_{\text{req}}^{\text{PD}} + m_r \cdot \frac{1}{K_{d1}} \cdot \dot{s}_1(t) = \\ & -m_r \left[\frac{1}{K_{d1}} \cdot (\dot{s} + K_5 s_1 + K_6 \text{sgn } s_1) + \right. \\ & \left. \ddot{\beta} - \ddot{\psi}_r - \ddot{\delta} \right] - m_w uv + d_r r. \end{aligned} \quad (14)$$

3.2.2 NTSM 滑模控制器 (Non-singular terminal sliding mode controller)

选取 NTSM 的切换面^[6]

$$s_2 = e + K_{a2} s^{p/q}. \quad (15)$$

其中: $e = \psi_e - \delta$; $K_{a2} > 0$; $p > q > 0$ 是奇数. 对于理想滑模运动, 即 $s_2 = 0$, 在其两边对时间求导, 可得:

$$\dot{s}_2 = \dot{s} + K_{a2} \frac{p}{q} s^{(p/q-1)} \dot{s} = 0. \quad (16)$$

同理, 根据等效控制与指数趋近律方法, 可得到满足滑模存在条件

$$s_2 \dot{s}_2 \leq -K_7 s_2 - K_8 |s_2|$$

的滑模控制律

$$\begin{aligned} \tau_r^{\text{NTSM}} = & -m_r \left[\frac{1}{K_{a2}} \cdot \frac{q}{p} \cdot s^{1-q/p} \cdot (\dot{s} + K_7 s_2 + \right. \\ & \left. K_8 \text{sgn } s_2) + \ddot{\beta} - \ddot{\psi}_r - \ddot{\delta} \right] - m_w uv + d_r r. \end{aligned} \quad (17)$$

对于任意给定初始跟踪误差 $e(0) \neq 0$, 若始终在 NTSM 控制律作用下, 则闭环系统能在有限时间

$$t_s = \frac{p}{(1/K_{a2})^{q/p} (p-q)} |e(0)|^{(1-q/p)} \quad (18)$$

到达平衡点 $e = 0$. 当接近平衡点时, 滑模 s_2 中非线性项导致收敛速度指数加快, 改进了平衡点的收敛性. 一般而言, 终端滑模的稳态跟踪精度是较高的.

3.2.3 模糊混合控制器 (Fuzzy hybrid controller)

首先, 建立一个 Sugeno 型模糊推理系统, 其输入变量为 $(|e|, \tau_r^{\text{NTSM}}, \tau_r^{\text{PD}})$, 输出变量为转舵力矩 τ_r . 其中, $|e| \in [0, 180^\circ]$ 是跟踪姿态误差 $e = \psi_e - \delta$ 的绝对值. 它的隶属度函数有两条, 即 $w_{\text{Small}}(\cdot)$

和 $w_{\text{Large}}(\cdot)$, 分别代表“Small”和“Large”, 如下图3所示. 另外, 由于在模糊规则的前项条件中并不包含 τ_r^{PD} 和 τ_r^{NTSM} , 因此无需为其选定隶属度函数.

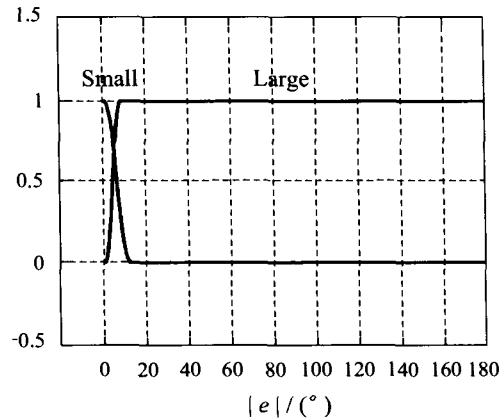


图3 $|e|$ 的隶属度函数

Fig. 3 Membership function of $|e|$

随后, 建立 Sugeno 型系统的模糊规则, 可描述如下:

- 1) If $|e|$ is Small, then $\tau_r = \tau_r^{\text{NTSM}}$,
- 2) If $|e|$ is Large, then $\tau_r = \tau_r^{\text{PD}}$.

最后, 总的输出实际上就是所有结果的加权均值, 即

$$\tau_r = \frac{w_{\text{Large}}(|e|) \cdot \tau_r^{\text{PD}} + w_{\text{Small}}(|e|) \cdot \tau_r^{\text{NTSM}}}{w_{\text{Large}}(|e|) + w_{\text{Small}}(|e|)}, \quad (19)$$

保证无论输入为何值, 皆有 $\sum_i w_i \neq 0$ 且 $w_{(\cdot)} \geq 0$.

至此, 一个完整的由式(6)(9)及(19)所共同组成的 AUV 航行系统的 PF 路径跟踪控制律就完全建立起来.

由于符号函数的不连续性, 系统在滑模切换面附近运动时难免会发生高频颤振, 这是滑模控制设计的难题之一. 为降低颤振, 在本文中, 将上述控制律(6)(9)(14)和(17)中的不连续 $\text{sgn } s$ 函数替换为满足滑模条件 $s \cdot \dot{s} \leq 0$ 的 S 型饱和函数^[11]

$$\text{sgn } x = \frac{1 - e^{-bx}}{1 + e^{-bx}}, \quad (20)$$

其中 b 为边界层厚度.

4 仿真 (Simulation)

为了验证以上所提控制律, 我们对一条 AUV^[9] 系统进行了 PF 路径控制仿真研究. 该系统的相关物理参数是 $m = 185 \text{ kg}$, $I_z = 50 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$, $X_u = -30 \text{ kg/s}$, $X_u = -70 \text{ kg/s}$, $X_{|u|u} = -100 \text{ kg/m}$, $Y_v = -80 \text{ kg/s}$, $Y_v = -100 \text{ kg/s}$, $Y_{|v|v} = -200 \text{ kg/m}$, $N_r = -30 \text{ kg} \cdot$

m^2 , $N_r = -50 \text{ kg} \cdot \text{m/s}$, $N_{|r|} = -100 \text{ kg} \cdot \text{m}$. 控制律 (6)(9)(14) 和 (17) 中的参数分别取为 $K_1 = 1.0$, $K_2 = 1.0$, $K_3 = 1.0$, $K_4 = 2.0$, $K_5 = 1.0$, $K_6 = 10.0$, $K_7 = 1.0$, $K_8 = 10.0$, $K_{d1} = 0.34$, $K_{d2} = 1.2$, $p = 11$, $q = 9$, $u_d = 0.5144 \text{ m/s}$. 为消除滑模控制器高频颤振问题, 将上述控制器中的不连续符号函数均替换为连续的 S 型饱和函数, 其边界层厚度均取为 0.1. 为了充分检验 AUV 的路径跟踪效果, 采用一条 S 形的自由曲线作为预定跟踪的参考路径.

首先, 在初始状态为 $(u_0, v_0, r_0, \xi_0, \eta_0, \psi_0)^T = (0.4630, 0, 0, -60, -10, 45^\circ)^T$ 的情况下, 进行了 AUV 的 PF 路径跟踪仿真计算. 在仿真过程中, 路径上的参考点 R 从初始时刻的弧长坐标 $s_0 = 0$ 处出发. 仿真结果如上图 4 所示: 图 4(a) 是运动状态随时间变化图; 图 4(b) 分别展示了切向跟踪位置误差 τ_e 、滑模 s 及输入推力、力矩随时间变化情况; 图 4(c) 描述了路径跟踪控制过程中 AUV 的运动轨迹. 从仿真结果可知, 在本文所述的控制律作用下, AUV 能克服较大的初始位姿误差, 快速地运动到预定参考路径 (如图 4(c) 中轨道线所示), 且在此后的运动过程中始终保持在其上. 在整个跟踪过程中, 输入推力和力矩随时间变化平滑, 无颤振现象. 结果表明该反馈控制系统具有良好的路径跟踪效果和全局稳定特性, 对于初始误差有较好的鲁棒性.

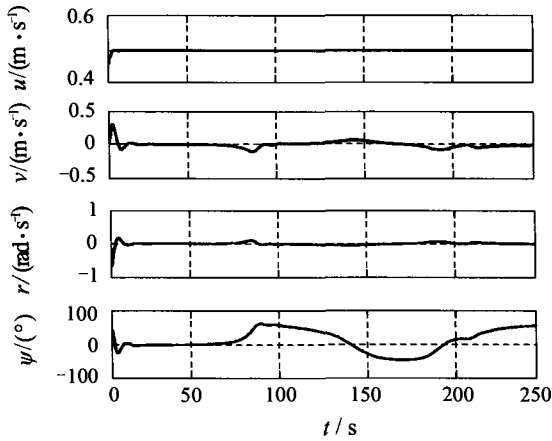
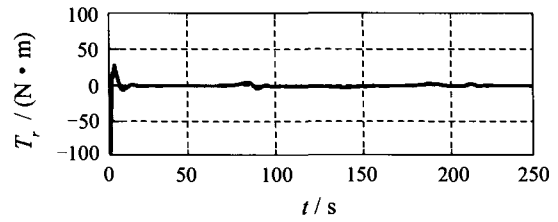
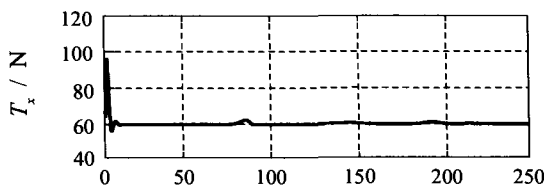
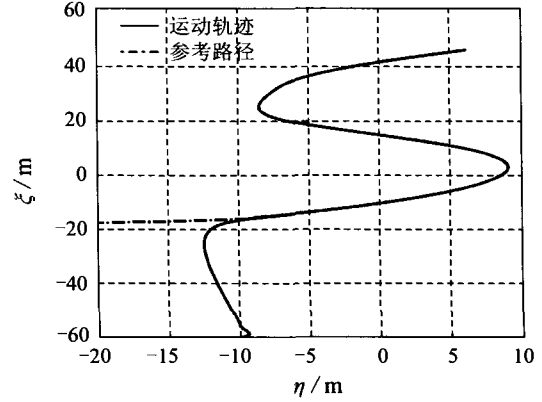
图 4(a) u, v, r, ψ 随时间变化图Fig. 4(a) $u, v, r, \psi \sim \text{time}$ 图 4(b) τ_e, s, T_x, T_r 随时间变化图Fig. 4(b) $\tau_e, s, T_x, T_r \sim \text{time}$ 

图 4(c) 路径跟踪控制轨迹图

Fig. 4(c) Motion trajectory by path following control

随后, 为检验本控制律对于系统模型参数变化的敏感性, 特将控制系统中的水动力参数值 X_u , $X_{|u|u}$, Y_v , $Y_{|v|v}$, N_r 和 $N_{|r|r}$ 等项都同时增加 50%, 然后在此种情况下进行 PF 路径跟踪控制仿真研究. 仿真结果显示于下图 5 中, 并且与正常情况下的仿真结果进行了比较. 其中虚线是控制律中水动力参数正常情况下的运动轨迹, 实线代表水动力参数改变后的跟踪运动轨迹, 而轨道线则是预定跟踪的参考路径. 从图中可以看出, 当水动力参数值发生较大变化时, 路径跟踪控制的效果仍然较好, 充分说明该控制律对于模型参数变化并不敏感, 具有良好的鲁棒性.

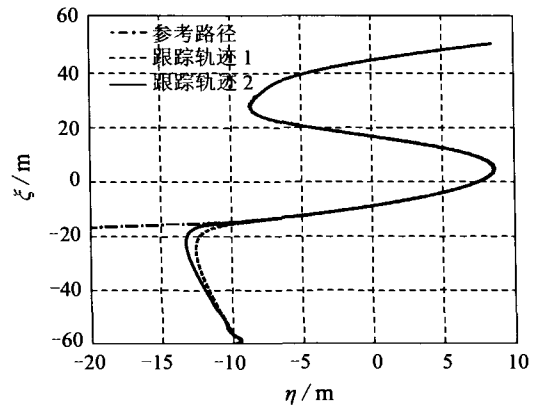


图 5 含参数不确定性的路径跟踪控制轨迹图

Fig. 5 Motion trajectories of path following control with parameter uncertainties

5 结语 (Conclusion)

虽然终端滑模相较于传统的线性滑模控制器而言具有有限时间收敛和更高的稳态跟踪精度,但是当系统远离平衡点时,现有的 TSM 控制性能不如线性滑模控制. 为了实现不同滑模控制器之间的优势互补,本文采用 Sugeno 型模糊推理系统,提出了基于 PD 滑模控制器与非奇异终端滑模控制器的模糊混合控制方法. 将此模糊混合控制器用于方向子系统控制,本文为非线性欠驱动自治水下机器人,设计了鲁棒性能良好的非时间参考 PF 路径跟踪控制律. 与其它依赖于 Backstepping 控制设计的方法相比,该方法无需引入中间控制变量,简捷高效,利于降低控制系统的差错率. 仿真试验结果证明本文所设计的控制律能够有效驱动 AUV 进行路径跟踪,并且对于初始状态误差和系统参数不确定性都具有良好的鲁棒性.

参考文献 (References):

- [1] GODHAVN J M. Nonlinear tracking of underactuated surface vessels [C]// *Proc 35th IEEE Conference on Decision and Control*. Kobe, Japan; IEEE Press, 1996: 987-991.
- [2] SKJETNE R, FOSSEN T I. Nonlinear Maneuvering and Control of Ships [C] // *Proc of Oceans 2001 MTS/IEEE Conference*. Honolulu, Hawaii, USA; IEEE Press, 2001: 1808-1815.
- [3] LAPIERRE L, SOETANTO D, PASCOAL A. Nonlinear Path Following with Applications to the Control of Autonomous Underwater Vehicles [C]// *Proc of the 42nd IEEE Conference on Decision and Control*. Maui, Hawaii, USA; IEEE Press, 2003: 1256-1261.
- [4] DO K D, JIANG Z P, PAN J. Robust adaptive path following of underactuated ships[J]. *Automatica*, 2004, 40 (6): 929-944.
- [5] MAN Z, PAPLINSKI A P, WU H. A robust MIMO terminal sliding mode control scheme for rigid robotic manipulators [J]. *IEEE Trans on Automatic Control*, 1994, 39 (12): 2464-2469.
- [6] FENG Y, YU X, MAN Z. Non-singular terminal sliding mode control of rigid manipulators [J]. *Automatica*, 2002, 38 (12): 2159-2167.
- [7] YU X, MAN Z. Fast terminal sliding-mode control design for nonlinear dynamical systems [J]. *IEEE Trans on Circuits and Systems-I: Fundamental Theory and Applications*, 2002, 49 (2): 261-264.
- [8] 诸静. 模糊控制原理与应用[M]. 北京:机械工业出版社,1995. (ZHU Jing. *Fuzzy Control Principle and Application* [M]. Beijing: Engineering Industry Press, 1995.)
- [9] FJELLSTAD OLA-ERIK. Control of unmanned underwater vehicles in six degrees of freedom; a quaternion feedback approach [D]. Trondheim; Norwegian University of Science and Technology, 1994.
- [10] 吴卫国, 陈辉堂, 王月娟. 移动机器人的全局轨迹跟踪控制[J]. 自动化学报, 2001, 27(3): 326-331. (WU Weiguo, CHEN Huitang, WANG Yuejuan. Global trajectory tracking control of mobile robots [J]. *Acta Automatica Sinica*, 2001, 27(3): 326-331.)
- [11] 王敏, 杜克林, 黄心汉. 机器人滑模轨迹跟踪控制研究[J]. 机器人, 2001, 23(3): 217-221. (WANG Min, DU Kelin, HUANG Xinhan. Research on tracking control of robotic sliding mode trajectory [J]. *Robot*, 2001, 23(3): 217-221.)

作者简介:

马 岭 (1977—), 男, 博士研究生, 从事水下机器人操纵与控制研究, E-mail: willmaling@sjtu.edu.cn;

崔维成 (1963—), 男, 研究员, 研究方向为船舶力学.