

基于混合模糊 P+ID 控制的欠驱动 AUV 路径跟踪控制及仿真

田宇^{1,2}, 张艾群¹, 李伟¹

(1. 中国科学院沈阳自动化研究所机器人学国家重点实验室, 沈阳 110016; 2. 中国科学院研究生院, 北京 100049)



摘要: 针对欠驱动自主水下机器人 (AUV) 水平面路径跟踪控制问题进行研究。基于解析形式描述的单输入模糊控制器, 提出了一种混合模糊 P+ID 控制算法。将其应用于欠驱动 AUV 路径跟踪控制中的趋近角跟踪控制, 研究了控制器设计和参数调节方法, 并采用小增益定理对基于混合模糊 P+ID 控制的趋近角跟踪控制系统的稳定性进行了分析。最后, 采用欠驱动 AUV 非线性动力学模型进行仿真研究, 结果表明基于提出的混合模糊 P+ID 控制的欠驱动 AUV 路径跟踪控制系统具有很好的鲁棒性和适应性, AUV 能够精确跟踪预规划的航行路径。

关键词: 自主水下机器人; 欠驱动; 路径跟踪控制; 混合模糊 P+ID 控制

中图分类号: TP273 **文献标识码:** A **文章编号:** 1004-731X (2012) 05-

Path-following Control and Simulation of Underactuated Autonomous Underwater Vehicles Based on Fuzzy P plus ID Control

TIAN Yu^{1,2}, ZHANG Ai-qun¹, LI Wei¹

(1. State Key Laboratory of Robotics, Shenyang Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China;
2. Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: The issue of 2D path-following control of underactuated autonomous underwater vehicles was studied. Based on single-input fuzzy controller expressed in analytical form, a hybrid fuzzy P plus ID control algorithm was proposed. And its application to the tracking control of path-following approach angle was investigated. The design and parameter tuning of the tracking controller was studied, and the stability of the tracking control system based on the proposed hybrid fuzzy P plus ID control algorithm was analyzed using small gain theorem. At last, simulation studies using the nonlinear dynamic model of an underactuated AUV were implemented, and the results demonstrate the robustness and adaptability of the hybrid fuzzy P plus ID based path-following control system, and the AUV can follow the predefined path precisely.

Key words: autonomous underwater vehicles; underactuated; path-following control; hybrid fuzzy P plus ID control

引言

自主水下机器人 (Autonomous Underwater Vehicles, AUVs) 的许多作业如海洋要素场高精度测绘等, 任务目标都要求 AUV 在非定常、非均匀流场等复杂海洋环境的影响下精确跟踪预规划的航行路径, 以收集期望的传感器信息。由于 AUV 六自由度动力学模型的非线性、耦合性及参数的时变性, 加之受到复杂的非线性海洋环境干扰, 控制在海洋中航行的 AUV 精确跟踪预规划的航行路径仍是 AUV 运动

控制领域研究的热点。

目前绝大多数的调查探测型 AUV 都是欠驱动形式^[4], 即通常只有 AUV 的前向、艏向和俯仰自由度是直接可控的, 因此, 欠驱动 AUV 的路径跟踪控制就成为研究的重点, 并已开展了大量的研究工作^[1-7], 其中又以保证路径跟踪误差全局渐进收敛到零的基于 AUV 动力学模型的控制方法和算法为研究的热点^[1-4]。

目前, 虽然针对 AUV 的运动控制已开展了大量的研究工作, 研究人员提出并研究了多种基于/不基于 AUV 动力学模型的控制方法和算法, 如鲁棒、自适应、滑模、模糊、神经网络控制等, 但 PID 控制由于具有不依赖于 AUV 动力学模型、结构简单、参数现场调节容易等优点, 且控制性能在许多 AUV 工程应用场合也满足要求, 因此仍是目前 AUV

收稿日期: 2010-06-01

修回日期: 2010-12-06

基金项目: 国家 863 高技术研究发展计划 (2007AA09Z207); 机器人学国家重点实验室课题 (08A120N201, RLZ200810)。

作者简介: 田宇 (1982-), 男, 辽宁鞍山人, 博士生, 研究方向为水下机器人规划、控制; 张艾群 (1959-), 男, 辽宁沈阳人, 研究员, 博导, 研究方向为水下机器人技术。

工程应用中广泛采用的控制方法。然而，考虑到 AUV 动力学和环境干扰均为非线性，应用线性 PID 控制于 AUV 路径跟踪控制将难以获得很好的性能。

文献[8,9]提出一种混合模糊 P+ID 控制方法，即基于 PID 的控制结构，保留常规的积分和微分项不变，采用模糊控制器取代常规 PID 控制器中的比例项，仿真和实验结果^[8-10]验证了基于提出的混合模糊 P+ID 的控制系统具有很好的鲁棒性和适应性。本文借鉴[8,9]的研究，提出一种新的混合模糊 P+ID 控制算法，并将其应用于欠驱动 AUV 路径跟踪控制。

1 混合模糊 P+ID 控制

常规离散形式的 PID 控制器为：

$$o(k) = K_p e(k) + K_I \sum_{i=1}^k e(i)T + K_D \dot{e}(k) \quad (1)$$

其中 K_p 、 K_I 和 K_D 分别为 PID 控制器的比例、积分和微分系数， $e(k)$ 和 $\dot{e}(k)$ 分别为 k 时刻的控制偏差和偏差变化率， $o(k)$ 为 k 时刻的控制输出， T 为控制周期。PID 控制器 (1) 中，积分项的作用主要是减小控制系统的稳态误差；微分项的作用主要是增加系统阻尼，使控制响应平滑，改善系统的稳定性；而比例项则影响系统响应的快速性、超调、控制精度和稳定性等性能，是 PID 控制中的重要部分。

本文借鉴[8,9]的研究，将 PID 控制器 (1) 比例项中的误差 $e(k)$ 通过模糊控制器进行非线性变换，将模糊控制器的输出 $e_f(k)$ 作为新的误差，而保持 PID 控制器的结构、参数，和积分项中的 $e(k)$ 和微分项中的 $\dot{e}(k)$ 不变。为了提高性能，将归一化的滑动误差^[11]：

$$SE^*(k) = SE(k) / Ge \\ = (\lambda e(k) + (1 - \lambda) \dot{e}(k)) / Ge \quad (2)$$

作为模糊控制器的输入，其中 $0 < \lambda \leq 1$ ，为对误差 $e(k)$ 和误差变化率 $\dot{e}(k)$ 的加权系数， Ge 为对滑动误差 $SE(k)$ 的归一化因子；模糊控制器的输出 $e_f^*(k)$ 为归一化的 $e_f(k)$ ， $e_f^*(k) = e_f(k) / Gu$ ， Gu 为对 $e_f(k)$ 的归一化因子。

如果将 $SE^*(k)$ 和 $e_f^*(k)$ 分别划分为五个量化等级，分别对应于正大 (PB)、正中 (PM)、零 (ZO)、负中 (NM)、负大 (NB) 五个模糊语言变量，制定模糊控制规则如下：

- Rule 1: if $SE^*(k)$ is PB, then $e_f^*(k)$ is PB
- Rule 2: if $SE^*(k)$ is PM, then $e_f^*(k)$ is PM
- Rule 3: if $SE^*(k)$ is ZO, then $e_f^*(k)$ is ZO
- Rule 4: if $SE^*(k)$ is NM, then $e_f^*(k)$ is NM
- Rule 5: if $SE^*(k)$ is NB, then $e_f^*(k)$ is NB

对输入和输出选取全交叠的三角形隶属函数，采用重心法作为解模糊化方法，通过调节输入和输出语言变量的隶属度函数，可以得到不同的控制器输入 $SE^*(k)$ —输出 $e_f^*(k)$ 关系曲线。从该单输入模糊控制器的输入输出关系曲线可以看出，其形式可以近似为折线，当量化等级越多，该折线则越

平滑，并可以由曲线来近似^[12]。因此，为了便于分析和设计，采用解析式来描述该模糊控制器，本文采用 Sigmoid 函数曲线近似该模糊控制器的 $SE^*(k)$ — $e_f^*(k)$ 关系曲线^[12]，则该模糊控制器的输出为：

$$e_f^*(k) = \frac{2.0}{1.0 + \exp(-K \times SE^*(k))} - 1.0 \quad (3)$$

其中 $K > 0$ 为调节 Sigmoid 曲线形状的参数，也即为调节该模糊控制器的参数。

因此，本文提出的混合模糊 P+ID 控制算法为：

$$o(k) = K_p \times Gu \times e_f^*(k) + K_I \sum_{i=1}^k e(i)T + K_D \dot{e}(k) \quad (4)$$

其中共需设计和调节 K_p 、 K_I 、 K_D 、 Ge 、 Gu 、 λ 和 K 七个参数。

2 欠驱动 AUV 路径跟踪控制

2.1 路径跟踪误差

由于 AUV 绝大多数的调查探测作业都以水平面运动为主，因此本文研究欠驱动 AUV 二维水平面路径跟踪控制。路径跟踪控制的研究主要包括路径跟踪误差的定义和保证路径跟踪误差全局渐进收敛到零的控制器设计，因此参考文献[1,2,4-6]中的研究，首先在 Serret-Frenet (SF) 坐标系下定义 AUV 的路径跟踪误差 (图 1)。

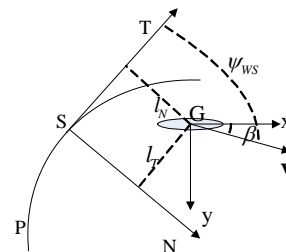


图 1 路径跟踪误差示意图

令 S 为预规划的水平面航行路径 P 上的运动参考点，该路径在参考点 S 处的单位切向量 T 和单位法向量 N ，在该点处张成直角坐标系 SF 。AUV 以重心 G 为原点的载体坐标系为 $Gxyz$ ，绕载体坐标系的 z 轴旋转漂角 β ，得到 AUV 的速度坐标系 W ， ψ_{ws} 为从 SF 坐标系到 W 坐标系的旋转欧拉角。

AUV 跟踪路径 P ，即其速度坐标系以期望合速度 V_{ic} 跟踪运动坐标系 SF (V_{ic} 方向跟踪 T 方向)，因此，路径跟踪误差包括合速度跟踪误差 $e_{Vc} = V_{ic} - V_t$ ，和在 SF 坐标系中表示的位置跟踪误差 (AUV 的重心位置 G 在 SF 坐标系中的位置向量) $[l_t, l_n]^T$ ，和角度跟踪误差 ψ_{ws} 。

2.2 路径跟踪控制器

对于合速度 V_{ic} 跟踪控制，可以采用 AUV 前向速度控制

器。由于 AUV 的前向动力学模型的获取相对容易, 因此前向速度控制器通常采用反馈线性化的方法进行设计。如 AUV 的前向动力学模型可以表示为:

$$\dot{u} = f_u + \frac{1}{m} X_{prop} \quad (5)$$

其中 u 为 AUV 的前向速度, m 为 AUV 的质量 (包括附加质量), X_{prop} 为推进器产生的前向推力, f_u 为 AUV 的前向动力学模型。令 $e_u(k) = u_c(k) - u(k)$ 为 k 时刻前向速度误差, 其中 $u_c(k) = V_{ic}(k) \cos(\beta)$ 和 $u(k)$ 分别为 AUV 期望前向速度和实际前向速度, 选取 Lyapunov 函数为 $V_u = 1/2e_u^2$, 则选取如下的前向速度控制律:

$$X_{prop} = m\dot{u}_c - mf_u + k_u m e_u \quad (6)$$

可以保证 $\dot{V}_u \leq 0$, 其中 k_u 为设计的正常数。

对于欠驱动 AUV, 不能直接将路径跟踪位置误差用于闭环反馈控制。因此引入趋近角^[1,2,4-6]:

$$\psi_a = -\text{sign}(V_t) \psi_l \left(\frac{2.0}{1.0 + e^{-k_N l_N}} - 1.0 \right) \quad (7)$$

其中 V_t 为 AUV 实际合速度, $\text{sign}(\cdot)$ 为符号函数, $0 < \psi_l \leq \pi/2$ 和 $k_N > 0$ 为设计参数。则如果设计控制器保证 V_t 跟踪 $V_{ic} > 0$, 角度误差 ψ_{ws} 跟踪趋近角 ψ_a , 并选取合适的路径参考点 S 的运动速度如:

$$\dot{s} = V_t \cos \psi_{ws} + k_s l_t \quad (8)$$

其中 s 为路径 P 在参考点 S 处的弧长, $k_s > 0$ 为一设计参数, 则可以保证路径跟踪位置和角度误差全局渐进收敛到零, 即当 $t \rightarrow \infty$ 时, 设计的控制器保证 $V_t \rightarrow V_{ic}$ 和 $\psi_{ws} \rightarrow \psi_a$, 则 $[l_t, l_N]^T \rightarrow 0$ 和 $\psi_{ws} \rightarrow 0$ 。详细证明参考文献[2,4]。

由于趋近角跟踪控制系统是一个复杂的非线性系统, 本文采用提出的混合模糊 P+ID 控制算法设计其控制器。

3 趋近角跟踪混合模糊 P+ID 控制器设计

3.1 控制器设计

趋近角 ψ_a 跟踪误差 $e_\psi(k)$ 可以表示为:

$$\begin{aligned} e_\psi(k) &= \psi_a(k) - \psi_{ws}(k) \\ &= \psi_a(k) - (\psi(k) + \beta(k) - \psi_{SF}(k)) \\ &= (\psi_a(k) + \psi_{SF}(k) - \beta(k)) - \psi(k) \end{aligned} \quad (9)$$

其中 ψ_{SF} 和 ψ 分别为 SF 坐标系 T 向量在大地坐标系中的角度和 AUV 的艏向角, 因此可以将 $(\psi_a(k) + \psi_{SF}(k) - \beta(k))$ 作为 AUV 艏向角的参考跟踪信号 $\psi_c(k)$, 采用 AUV 艏向角控制器用于趋近角跟踪控制。

在工程应用中, AUV 艏向角广泛采用离散形式的 PID 控制器:

$$o_\psi(k) = K_p e_\psi(k) + K_I \sum_{i=1}^k e_\psi(i)T - K_D r(k) \quad (10)$$

其中, $e_\psi(k) = \psi_c(k) - \psi(k)$ 为 k 时刻艏向角跟踪误差, $r(k)$ 为 k 时刻的艏向角速度, $o_\psi(k)$ 为 k 时刻艏向控制力矩, (10)

式中采用 $-r(k)$ 代替 $\dot{e}_\psi(k)$ 以避免系统刚启动时 $\dot{e}_\psi(k)$ 较大而产生过大的微分项控制输出, 且 $r(k)$ 也同样起到了系统阻尼的作用。

因此, 本文设计的趋近角跟踪混合模糊 P+ID 控制器基于 (10), 只需将其比例项中的 $e_\psi(k)$ 通过模糊控制器 (3) 进行非线性变换, 保持其它项不变, 即为:

$$o_\psi(k) = K_p \times Gu \times e_{f\psi}^*(k) + K_I \sum_{i=1}^k e_\psi(i)T - K_D r(k) \quad (11)$$

3.2 参数设计和调节

趋近角跟踪混合模糊 P+ID 控制器 (11) 中的 K_p 、 K_I 和 K_D 分别为 AUV 艏向角 PID 控制器的参数, 可以通过基于 AUV 动力学模型的理论计算分析来获得, 但更多的是在实际工程应用中, 由 AUV 的操作人员在现场进行手动调节, 获得使系统稳定且满足性能要求的一组参数。

参数 Ge 和 Gu 分别为模糊控制器的输入量化因子和输出比例因子。 Ge 的选取主要是根据对 AUV 跟踪精度的要求, 要求的跟踪精度越高, 则选取较小的 Ge 值; Gu 对控制系统的性能有较大的影响, Gu 值越大, 则控制的响应的速度越快, 控制的精度越高, 且当 $|e_{f\psi}^*(k)| \rightarrow 1$ 时, $K_p \times Gu$ 应大于等于 AUV 执行机构的最大输出, 以充分发挥其控制能力, 因此应选择 $Gu \geq o_{\psi \max} / K_p$, $o_{\psi \max}$ 为执行机构的最大控制输出。

参数 K 为调节模糊控制器非线性特性的参数, 且影响 $SE_\psi^* - e_{f\psi}^*$ 关系曲线在原点处的斜率。 K 值的选取一方面要考虑到当 $|SE_\psi^*| \rightarrow 1$ 时, 使 $|e_{f\psi}^*| \rightarrow 1$; 另一方面 K 值不应过大, 以避免 $SE_\psi^* - e_{f\psi}^*$ 曲线在原点具有过大的斜率而使控制系统对高频动力学特性过于敏感, 因此, 一般选取 K 为 4—8 左右。

λ 为调节 $SE_\psi(k)$ 中误差和误差变化率的加权系数, 当系统响应较慢时, 可以增加 λ 值, 而当系统超调量较大时, 则可以减小 λ 值。

综上, 我们提出的参数设计和调节方法是: 在原有艏向角 PID 控制器的基础上, 首先根据 AUV 系统特性和跟踪精度要求选定 K 和 Ge 值, 然后设定 λ 为 1, 通过增加 Gu 直到获取满意的控制响应速度并出现超调, 最后在通过减小 λ 来减小控制的超调, 得到最终满意的控制性能。

3.3 稳定性分析

本节我们采用小增益定理^[13]分析趋近角跟踪控制系统的输入输出稳定性。小增益定理给出, 对于由 PID 控制器和 AUV 构成的闭环反馈控制系统, 如果 PID 控制器的增益 G_{PID} 和 AUV 对于控制信号 $o(k)$ 的增益 G_V 满足 $G_{PID}G_V < 1$, 则控制系统输入输出稳定, 即有界的输入产生有界的输出。对于 (10) 式所描述的 AUV 艏向角 PID 控制器的增益 G_{PID}

为 $\max\{|K_p + K_i T|, |K_D / T|\}$ [8], 如果 $|K_D / T| \geq |K_p + K_i T|$, 则 $G_{PID} = |K_D / T|$, 由 (10) 和 AUV 构成的闭环反馈控制系统输入输出稳定的充分条件为 $|K_D / T| G_v < 1$ 。

混合模糊 P+ID 控制器(11)中引入的模糊控制器改变了 PID 控制器 (10) 的比例项增益, 为 $\max\{|K_p G_F + K_i T|, |K_D / T|\}$, 其中 G_F 为该模糊控制器的最大增益, 可通过 $e_{\psi}(k)$ 对 $e_{\psi}(k)$ 求导获得, 结果为:

$$G_F = \frac{1}{2} \frac{Gu}{Ge} K \left(\lambda + \frac{1-\lambda}{T} \right) \quad (12)$$

如果同样满足 $|K_D / T| \geq |K_p G_F + K_i T|$, 则由 (11) 和 AUV 构成的闭环反馈控制系统输入输出稳定的充分条件同样为 $|K_D / T| G_v < 1$ 。

因此, 在设计和调节模糊控制器的参数时, 参数之间如满足如下稳定性条件:

$$\left| K_p \frac{1}{2} \frac{Gu}{Ge} K \left(\lambda + \frac{1-\lambda}{T} \right) + K_i T \right| \leq \left| \frac{K_D}{T} \right| \quad (13)$$

则可以保证趋近角跟踪混合模糊 P+ID 控制系统与已有的 AUV 艏向角 PID 控制系统具有相同的稳定性。

4 仿真

本文采用 REMUS AUV 水平面三自由度非线性动力学模型 [14] 进行仿真研究。该 AUV 配置一个主推进器用于前向速度控制, 配置一对垂直舵用于艏向控制, 最大舵角限定在 13.6 度。

仿真中, 在 AUV 航速为 1.5 m/s 下调节得到的一组水平面运动控制器参数为: 前向速度控制器参数 $k_u = 5$; 艏向角 PID 控制器参数为 $K_p = 2.0$ 、 $K_i = 1.0$ 和 $K_D = 2.2$, 其中积分项只在误差小于 5 度时引入。在此基础上, 设计和调节得到的趋近角跟踪混合模糊 P+ID 控制器附加参数为: $K = 5$ 、 $\lambda = 0.9$ 、 $Ge = 10\pi / 180$ 和 $Gu = 0.35$ 。设计的趋近角 (7) 的参数为 $\psi_i = \pi / 2$ 、 $k_v = 0.3$, 运动参考点 S 的运动速度 (8) 的参数为 $k_s = 0.2$ 。

仿真中, 首先令 AUV 以 1.5 m/s 的合速度跟踪平圆周路径:

$$\begin{cases} x = 15\cos(t) \\ y = 15\sin(t) \end{cases} \quad (14)$$

仿真时间为 100 s, 仿真周期和 AUV 的控制周期均为 0.1 s, AUV 从初始艏向角为 0 度的静止状态出发, 分别对 PID 控制器 (10) 和混合模糊 P+ID 控制器 (11) 进行仿真, 结果如图 2—图 5 所示: 图 2 为 AUV 的路径跟踪轨迹; 图 3 为 AUV 重心距离路径参考点 S 的距离; 图 4 为控制舵角曲线, 图 5 为 AUV 的合速度; 图中实线为混合模糊 P+ID 控制仿真结果, 虚线为 PID 控制仿真结果。

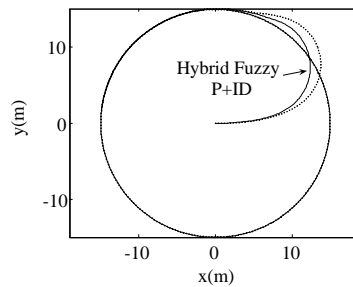


图 2 AUV 航迹

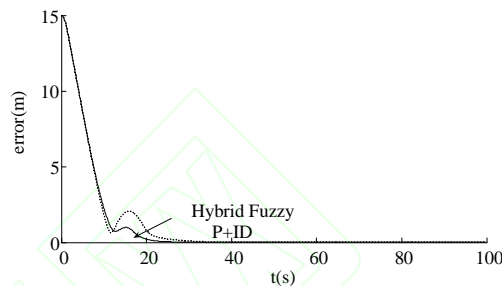


图 3 路径跟踪位置误差

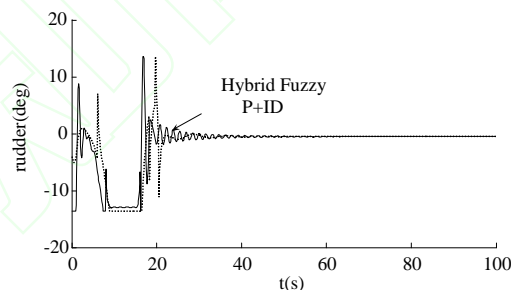


图 4 垂直舵角

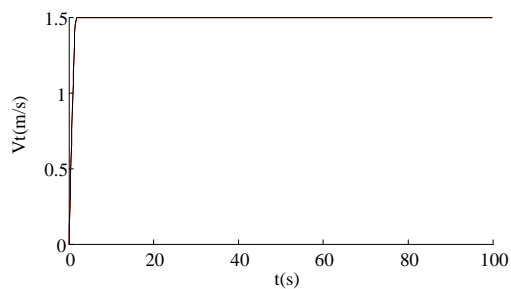


图 5 AUV 合速度

在海洋中航行的 AUV, 经常受到如海流、海浪等非线性海洋环境的干扰, 因此, 在仿真中我们在 AUV 的纵向 X 和横向 Y 分别加入随时间变化的干扰力:

$$\begin{cases} X_d = 15\sin(0.3t) \\ Y_d = 15\sin(0.3t) \end{cases} \quad (15)$$

以考察在环境干扰下 AUV 的路径跟踪性能; 同时, 考虑到在海洋中航行的 AUV 主要采用航位推算方法进行水下

定位, 并采用如长基线等声学定位方法对推算位置进行校正, 所以在仿真中第 50 s 时在推算位置上引入 (-2,-2) m 的位置校正, 以考察 AUV 位置在受到较大干扰情况下路径跟踪控制系统的收敛性能。

分别对 PID 控制器和混合模糊 P+ID 控制器进行仿真, 结果如图 6—图 8 所示: 图 6 为 AUV 的路径跟踪轨迹; 图 7 为通过航位推算得到的 AUV 重心位置距路径参考点 S 的距离; 图 8 为 AUV 的合速度; 图中实线为混合模糊 P+ID 控制仿真结果, 虚线为 PID 控制仿真结果。

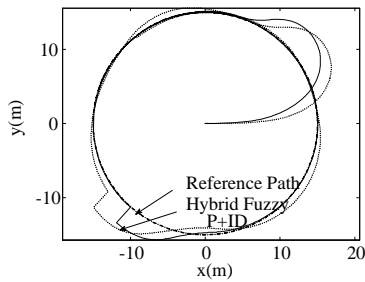


图 6 AUV 航迹

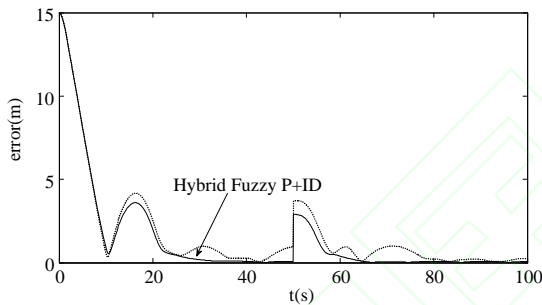


图 7 路径跟踪位置误差

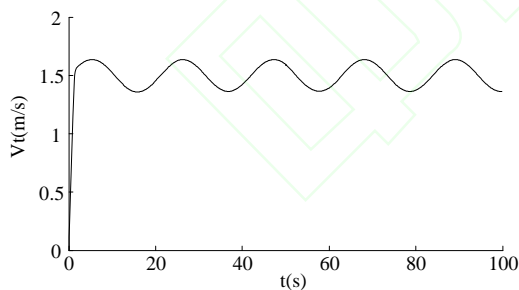


图 8 AUV 合速度

从仿真结果可以看出, 由于控制器参数均是在设计航速 1.5 m/s 下调节得到的, 因此在设计航速下, 基于 PID 控制和基于混合模糊 P+ID 控制的路径跟踪控制系统均具有很好的性能; 而在 AUV 受到环境干扰的情况下, 基于 PID 控制的路径跟踪控制系统性能变差, 而混合模糊 P+ID 控制中引入了模糊控制器, 使路径跟踪控制系统具有更好的鲁棒性和适应性, 仍然可以实现 AUV 对预规划路径的精确跟踪。

5 结论

本文提出的混合模糊 P+ID 控制算法, 采用解析形式描述模糊控制器, 形式简单, 算法程序编写容易。将其应用于欠驱动 AUV 路径跟踪控制中, 用于非线性的趋近角跟踪控制, 设计控制器时, 以 AUV 艏向角 PID 控制器为基础, 在此之上只需设计和调节模糊控制器的附加参数, 而且参数设计如满足稳定性条件, 趋近角跟踪控制系统的稳定性也从理论上得到了保证, 仿真结果也表明了基于本文提出的混合模糊 P+ID 的欠驱动 AUV 路径跟踪控制系统具有很好的性能。

目前, 本文主要是借鉴文献[8,9]的研究, 仅在 PID 控制的比例项中引入模糊控制, 没有考虑微分项和积分项中也同样引入模糊控制, 主要是考虑到在尽可能增加较少控制器参数和控制器调节复杂性的情况下, 提高 PID 控制的性能, 以便于研究的控制算法在 AUV 上的实际工程应用。后续研究工作中我们也要考虑对微分和积分项中同样引入模糊控制, 以研究其对本文研究的控制算法的性能的进一步提升情况。

参考文献:

- [1] P Encarnacao, A Pascoal. 3D Path Following for Autonomous Underwater Vehicle [C]// Proceedings of the 39th IEEE Conference on Decision and Control, Sydney, Australia. USA: IEEE, 2000: 2977-2982.
- [2] L Lapierre, D Soetanto, A Pascoal. Nonlinear Path Following with Applications to the Control of Autonomous Underwater Vehicles [C]// Proceedings of the 42nd IEEE Conference on Decision and Control, Manu, Hawaii, USA. USA: IEEE, 2003: 1256-1261.
- [3] K D Do, J Pan, Z P Jiang. Robust and Adaptive Path Following for Underactuated Autonomous Underwater Vehicles [J]. Ocean Engineering (S0029-8018), 2004, 31(16): 1967-1997.
- [4] L Lapierre, B Jouvencel. Robust Nonlinear Path-Following Control of an AUV [J]. IEEE Journal of Oceanic Engineering (S0364-9059), 2008, 33(2): 89-102.
- [5] L Ma, W C Cui. Path Following Control of a Deep-Sea Manned Submersible based upon NTSM [J]. China Ocean Engineering (S0890-5487), 2005, 19(4): 625-636.
- [6] 马岭, 崔维成. NTSM 控制的 AUV 路径跟踪控制研究[J]. 中国造船, 2006, 47(4): 76-82.
- [7] 甘永, 万磊, 陆雯雯, 庞永杰. 无舵翼水下机器人路径跟踪控制研究[J]. 海洋工程, 2007, 25(1): 70-75.
- [8] W Li. Design of a Hybrid Fuzzy Logic Proportional plus Conventional Integral-Derivative Controller [J]. IEEE Transactions on Fuzzy Systems (S1063-6706), 1998, 6(4): 449-463.
- [9] W Li, X G Chang, J Farrell, F M Wahl. Design of an Enhanced Hybrid Fuzzy P+ID Controller for a Mechanical Manipulator [J]. IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics-Part B: Cybernetics (S1083-4427), 2001, 31(6): 938-945.
- [10] W Li, X G Chang, F M Wahl, J Farrell. Tracking Control of a Manipulator under Uncertainty by FUZZY P+ID Controller [J]. Fuzzy Sets and Systems (S0165-0114), 2001, 122(1): 125-137.
- [11] J Guo, F-C Chiu, C-C Huang. Design of a Sliding Mode Fuzzy Controller for the Guidance and Control of an Autonomous Underwater Vehicle [J]. Ocean Engineering (S0029-8018), 2003, 30(16): 2137-2155.

- [12] 李晔, 庞永杰, 万磊, 常文田, 梁宵. 水下机器人 S 面控制器的免疫遗传算法优化[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2006, 27(S): 324-330.
- [13] B M Mohan, A Sinha. Analytical Structure and Stability Analysis of a Fuzzy PID Controller [J]. Applied Soft Computing (S1568-4946), 2008, 8(1): 749-758.
- [14] T Prestero. Verification of a Six-Degree of Freedom Simulation Model for the REMUS Autonomous Underwater Vehicle [D]. USA: Massachusetts Institute of Technology-Woods Hole Oceanographic Institution, 2001.

