

带翼水下机器人的非线性拟合分段控制方法

庞永杰^{1,2}, 李 晔^{1,2}

(1. 哈尔滨工程大学水下机器人技术国防科技重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150001; 2. 哈尔滨工程大学船舶工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘要: S面控制方法可较好地解决水下机器人的运动控制问题,但由于其参数是固定的,无法达到全局最优.不同航渡速度段,采取不同的控制参数值,可保证水动力不同阶段控制输出的最优;但在速度变化的分界点,控制器输出有跳变,不利于系统的全局稳定性.利用T-S模糊系统逼近非线性连续函数的能力,采用非线性的S面函数作为模糊系统的后件,设计了基于T-S模型的S面控制器.通过T-S模型的引入,避免了控制器输出的跳变,增强了系统稳定性.将该方法应用于带翼水下机器人的深度控制,水池试验和湖中实验均证明了算法的有效性.

关键词: 水下机器人;非线性控制;深度控制;T-S模型;S面控制器

中图分类号: TP24 **文献标识码:** A **文章编号:** 1673-4785(2009)03-0258-06

Nonlinear fitted step control method for a winged micro autonomous underwater vehicle

PANG Yong-jie^{1,2}, LI Ye^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Autonomous Underwater Vehicle, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China; 2. College of Shipbuilding Engineering, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China)

Abstract: The S-surface controller is generally a good tool for motion control of underwater vehicles, yet it cannot reach a global optimum, for its parameters are constants. If different parameters are used at different velocities, control output is optimal at those different hydrodynamic phases. Unfortunately this causes the output of the controller to have abrupt changes at the boundaries of velocity subsections, affecting the global stability of the system. To overcome this, a Takagi-Sugeno (T-S) fuzzy model was employed to approach nonlinear continuous functions and the nonlinear S-surface functions were used as the latter of the fuzzy system. On this basis, an S-surface controller was designed. With the introduction of the T-S model, abrupt changes in controller output were avoided, making the system more stable. Experiments in a water tank and lakes proved the validity of the algorithm.

Keywords: underwater vehicle; nonlinear control; depth control; T-S model; S surface controller

由于海洋环境的复杂性,以及水下机器人6个自由度运动的强非线性和相互耦合,因此水下机器人动力学模型相当复杂.尤其是带有操纵面(舵、翼等)的水下机器人,其运动模型更趋复杂^[1].因此,水下机器人控制系统的设计必须考虑非线性问题和不依赖于模型的控制方法.刘学敏博士提出了一种结构简单、输入量少、适用于非线性系统的新型控制方法——S面控制^[2].该方法将模糊控制的思想与

PID控制的结构相结合,既简化了控制器的设计,又能保证控制效果.为了加强机器人的自主性与适应性,改善机器人工作性能,刘建成博士等在文献[1]的基础上,增加了控制器的积分环节,并将Sigmoid函数开方,提出亚S面方法^[3].王丽荣博士利用不同类型的S型非线性函数代替Sigmoid函数,提出了广义S面控制器^[4].S面控制方法原型以及后续的改良型S面控制方法都经过了大量的试验,取得了较好的控制效果^[2-6].但以上方法都是从模糊控制的思想出发,控制器参数在不同的控制阶段都是固定值.随着航速的变化,水下机器人所受的粘性力变化很大.因此控制参数需要随航速变化适时改变.如果采用简单分段函数的形式,那么在速度变化分

收稿日期:2008-12-16.

基金项目:国家“863”计划资助项目(2008AA092301);水下机器人技术国防科技重点实验室开放课题基金资助项目(2007001).

通信作者:李 晔. E-mail: liye@hrbeu.edu.cn.

界点处,控制器输出有跳变,系统不稳定性增加.为此本文尝试 T-S 模糊模型,进行分段控制的非线性拟合.这既保证了控制参数的最优,又保证了系统稳定性.

1 S 面控制方法

S 面控制方法的控制模型为

$$\begin{cases} \dot{u}_i = 2.0 / (1.0 + \exp(-k_{i1}e_i - k_{i2}\dot{e}_i)) - 1.0 + \Delta u_i, \\ f_i = K_i u_i. \end{cases}$$

式中: e_i 和 \dot{e}_i 为第 i 自由度控制的输入信息(通过归一化处理的偏差和偏差变化率), u_i 为第 i 自由度控制输出, k_{i1} 和 k_{i2} 分别为对应第 i 个自由度偏差和偏差变化率的控制参数, Δu_i 为通过自适应方式得到的归一化后的固定干扰力的大小, f_i 为该自由度上所需力的大小, K_i 为该自由度上所能提供的最大推力与力矩.

人工调整控制器参数 k_1 和 k_2 ,使得在一般情况下水下机器人的运动控制满足要求. k_1 、 k_2 取得越大,响应对小偏差的敏感性就越高,但取得太大容易引起振荡.一般 k_1 和 k_2 的初始值选择在 3.0 左右,如果超调大了,可以适当减小 k_1 而增加 k_2 ;反之,如果收敛速度慢了,则可以适当增加 k_1 而减小 k_2 .

如此就构造了一个简单、实用的水下机器人控制器,在复杂的海洋环境下该控制器控制效果可以满足作业要求.

2 分段函数的引入

从控制模型的公式来看,其实际控制参数只有 2 个(k_1 和 k_2),需要调整的量就比模糊控制简单得多.但对于 S 面控制器来说,有一点是需要明确的,无论是人工调整还是自适应调整,都不能达到最佳的匹配;因为这些调整都是全局区域范围内的调整,而没有局部调整功能.无论如何,这里的参数的全局调整都是对系统的一种近似.毕竟,控制对象的复杂性和不确定性,使得任何一种函数的全局逼近都有很大的近似性.

为此,要达到全局最优的控制效果,不同航渡速度时,应取不同的控制参数值.在低航速时,希望响应快速,因此 k_1 应大,而 k_2 小;而在高航速时,为了避免超调和振荡应使 k_1 减小,而 k_2 增大.为此,尝试采用分段函数,以水平翼控制深度为例进行如下说明:

$$\begin{aligned} R^1: & \text{if } u \leq 0.5 \text{ kn}; \\ u_0 &= 2.1 / (1.0 + e^{(-0.021e - 0.033\dot{e})}) - 1.0; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} R^2: & \text{if } 0.5 \text{ kn} < u \leq 1.0 \text{ kn}; \\ u_0 &= 2.0 / (1.0 + e^{(-0.021e - 0.035\dot{e})}) - 1.0; \\ R^3: & \text{if } 1.0 \text{ kn} < u \leq 1.5 \text{ kn}; \\ u_0 &= 2.0 / (1.0 + e^{(-0.021e - 0.041\dot{e})}) - 1.0; \\ R^4: & \text{if } 1.5 \text{ kn} < u \leq 2.0 \text{ kn}; \\ u_0 &= 2.0 / (1.0 + e^{(-0.024e - 0.043\dot{e})}) - 1.0; \\ R^5: & \text{if } 2.0 \text{ kn} < u \leq 2.5 \text{ kn}; \\ u_0 &= 2.0 / (1.0 + e^{(-0.024e - 0.046\dot{e})}) - 1.0; \\ R^6: & \text{if } 2.5 \text{ kn} < u \leq 3.0 \text{ kn}; \\ u_0 &= 2.0 / (1.0 + e^{(-0.025e - 0.047\dot{e})}) - 1.0. \end{aligned}$$

实验证明:此分段函数可有效解决收敛速度与超调的矛盾,相应的 k_1 和 k_2 取值可满足控制要求^[7].但在速度变化分界点处,控制器输出有跳变.这对系统的稳定性非常不利,尤其对于水下机器人这样的强制解耦系统,某一自由度的震荡可引起其他自由度强烈的耦合运动.为了避免这一情况,借鉴模糊控制理论中的 T-S 模型,进一步优化了上述规则.

3 T-S 模型的全局最优逼近

3.1 T-S 模型

日本学者 T. Takagi 与 M. Sugeno 给出了一种模糊模型表示,它的模糊规则的前件与通常的相同,其后件不是简单的模糊语言值,而是输入变量的线性组合^[8,9].由于该模糊系统具有高度逼近非线性连续函数的能力,因而对它的研究受到人们广泛的关注.

Takagi-Sugeno 模型(又称 T-S 模型),它的后件不是由模糊量表示,而是一个精确函数,即

$$\text{if } x \text{ is } A \text{ and } y \text{ is } B \text{ and } \dots, \text{ then } z = f(x, y, \dots).$$

式中: A, B, \dots 为模糊量; x, y, \dots 为输入过程变量; $f(x, y, \dots)$ 为 x, y, \dots 的精确函数.

考虑输入为二维的 2 条模糊规则及其推理强度为

$$\begin{aligned} R^{(i)}: & \text{if } x \text{ is } A_i \text{ and } y \text{ is } B_i, \\ \text{then } z &= f_i(x, y, \dots), i = 1, 2; \\ W_i &= \mu_{A_i}(x) \wedge \mu_{B_i}(y). \end{aligned}$$

推理结果的精确量 z 采用加权平均的方法,为

$$z = \frac{W_1 f_1(x, y) + W_2 f_2(x, y)}{W_1 + W_2}.$$

式中 $f_i(x, y)$ 常取输入 x, y 的线性函数:

$$f_i(x, y) = p_i x + q_i y + r_i.$$

采用 T-S 模型的模糊控制器的控制机理在于利用 $f_i(x, y)$ 代表的线性系统在输入论域的不同区域对非线性控制函数作线性逼近.再利用模糊逻辑的无缝融合能力将各个线性控制器融合起来,整体上逼近系统的非线性控制函数.采用 T-S 模型的模糊

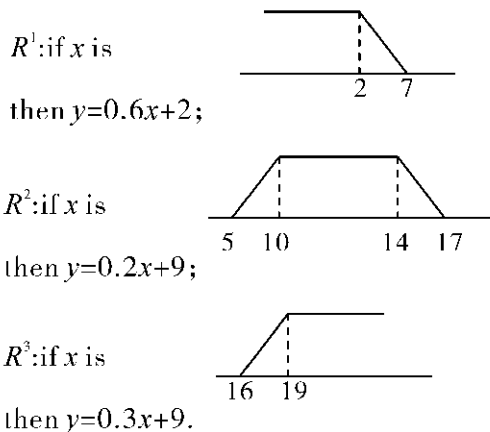
控制器已经在多个不同的领域得到了成功的应用. 然而, 由于其采用是线性函数对被控系统进行分步逼近, 因此其应用要求被控系统能够完全或近似地局部线性化. 对于水下机器人这样的强非线性系统, 简单的采用线性函数进行逼近显然是不合适的. 因此后件函数采用已被广泛证实有效的分段精确 S 面函数.

3.2 T-S 模型的平滑过渡能力

设某单输入单输出非线性控制方法定义如下:

$$\begin{cases} y = 0.6x + 2, & x \leq 6.5; \\ y = 0.2x + 9, & 6.5 < x < 16; \\ y = 0.3x + 3, & x \leq 16. \end{cases}$$

基于 T-S 模型平滑拟合该算法, 得到的模糊规则如下:



得到的控制曲线如图 1 所示的由“o”组成的曲线, 平滑地连接了上述 3 条直线.

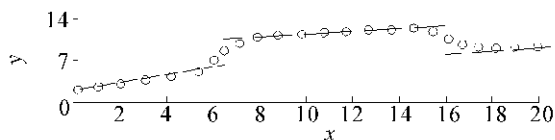


图1 T-S 模型平滑过渡分段直线

Fig.1 Smooth transition straight lines by T-S model

3.3 基于 T-S 模型的 S 面控制器优化

基于上述分析, 根据航速段的不同, 基于 T-S 模型的 S 面控制器 (T-S/SSC) 可定义以下 10 条规则:

- R^1 : 若航渡速度为正大,
 $u_0 = 2.0 / (1.0 + e^{(-0.025e - 0.047e)}) - 1.0$;
 R^2 : 若航渡速度为正中,
 $u_0 = 2.0 / (1.0 + e^{(-0.021e - 0.041e)}) - 1.0$;
 R^3 : 若航渡速度为正小,
 $u_0 = 2.0 / (1.0 + e^{(-0.021e - 0.033e)}) - 1.0$;
 R^4 : 若航渡速度为 0,
 $u_0 = 0$;
 R^5 : 若航渡速度为负小,

$$u_0 = 2.0 / (1.0 + e^{(-0.021e - 0.033e)}) - 1.0;$$

R^6 : 若航渡速度为负中,

$$u_0 = 2.0 / (1.0 + e^{(-0.021e - 0.041e)}) - 1.0;$$

R^7 : 若航渡速度为负大,

$$u_0 = 2.0 / (1.0 + e^{(-0.025e - 0.047e)}) - 1.0;$$

对航渡速度, 取三角形隶属度函数, 如图 2 所示.

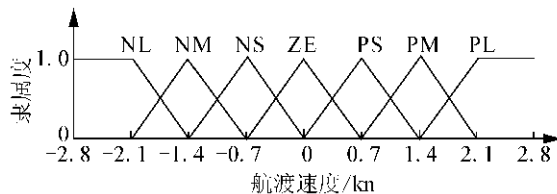


图2 隶属度函数

Fig.2 Membership function

这样, 通过 T-S 模型的引入, 避免了控制器输出的跳变, 可增强系统控制的稳定性.

4 T-S/SSC 的应用实例

“微龙-1”AUV 是为了探索水下机器人微小型化而设计的, 因而其尺寸小, 结构紧凑. 由于自身所带能源的限制, 只配置了 2 个主推进螺旋桨. 艏向控制由 2 个主推进通过推力差产生转艏力矩来实现. 通过尾水平襟翼提供纵倾力矩, 控制纵倾, 实现升沉来进行深度控制.

对“微龙-1”进行了模糊非线性分段控制的仿真试验. 在定深控制中, 将航渡速度采用三角形隶属度函数, 分为 7 个模糊子集 {负大, 负中, 负小, 零, 正小, 正中, 正大}. 模糊规则的后件参数 k_1, k_2 如表 1 所示.

表1 后件函数的参数

Table 1 Latter function parameters

航渡速度/kn	k_1	k_2
NL	0.025	0.047
NM	0.021	0.041
NS	0.021	0.033
0	0.000	0.000
PS	0.021	0.033
PM	0.021	0.041
PL	0.025	0.047

给定系统初态: 垂向深度 0, 纵向速度 0. 目标姿态: 垂向深度 2 m, 纵向速度为 1.5 kn. 系统在采用本章中提出的模糊 S 面控制和固定参数 S 面控制的作用下的系统响应曲线如图 3 所示.

在初始状态, 系统处于纵向速度从 0 开始加速状态, 并下潜. 其中, S 面控制器 SSC1、SSC2、SSC3 分别对应于偏差变化比例系数大于、等于和小于偏差比例

系数的控制器,具体参数见表2.图3中曲线给出了3个具有固定参数的S面控制器与T-S模糊非线性控制器的控制效果对比图.可以看出这3个控制器都没有解决好快速响应和小超调量之间的矛盾.

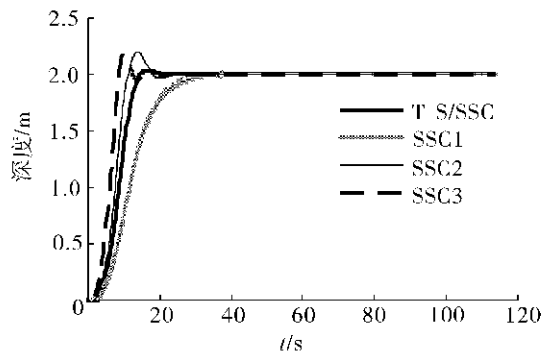


图3 模糊S面控制器与标准S面控制器控制效果对比图

Fig.3 Comparison of fuzzy S surface controller and standard S surface controller

表2 S面控制器的控制参数表

Table 2 Parameters of S surface controller			
控制参数	SSC1	SSC2	SSC3
k_1	0.021	0.030	0.033
k_2	0.033	0.030	0.020

从图3中可以看出,基于T-S模型的S面控制器T-S/SSC巧妙地融合了S面控制器SSC1的超调量小和SSC2、SSC3的快速响应特性,在超调量和响应速度之间达到了较好的平衡.而且这种平衡还可以根据实际应用中系统性能指标的要求通过调整模糊输入的隶属函数分布来调整.

基于T-S模型的S面控制器,由于其在状态空间的不同区域采用不同的控制参数,并且利用模糊逻辑巧妙地实现了具有不同参数和控制性能的S面控制器的无缝融合;因此在系统超调量和响应速度之间达到了较好的平衡,与采用固定参数的S面控制器相比具有更好的控制性能.

5 水池实验与自然水域实验

5.1 水池实验

图4是采用单纯分段控制的水池定深实验,机器人由 $u=0$ 加速到 $u=1.5$ kn,规划深度1.1 m.控制初始阶段较稳定.第14 s时,加速到 $u=1.0$ kn,由于分段控制的强制输出切换造成系统振荡.在第34 s后系统回归稳定.

在此试验的控制输出中,有2个分段点, $u=0.5$ kn和 $u=1.0$ kn.按照上文所述应有2个不稳定区域.但由于在控制初始阶段偏差较大,不管是处于

$u \leq 0.5$ kn控制段,还是 $0.5 \text{ kn} < u \leq 1.0$ kn控制段,控制输出的水平翼转角都为最大转角 20° ,因此看不出控制输出的跳变所带来的不稳定段.在加速到 $u=1.0$ kn处,由于分段控制的输出跳变,系统随之振荡约20 s才趋于稳定.此数据曲线充分说明了分段控制的问题所在.

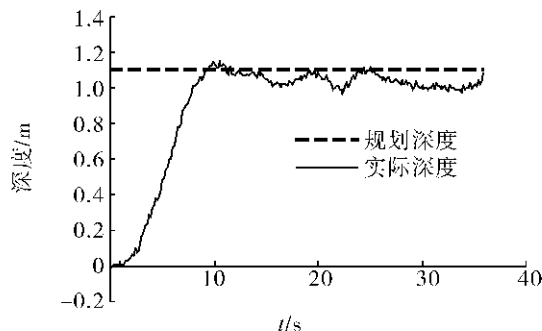


图4 分段控制定深曲线

Fig.4 Curves of step dept control

针对如图4出现的跳变问题,采用T-S模型拟合若干控制S面,控制响应曲线如图5所示.由于采用了前件模糊,后件精确的T-S模型,将分段控制面的断层拟合成渐变的曲面,不会出现跳变输出,因此也不会出现如图4的振荡阶段.同样定深1.1 m,系统无明显振荡阶段,比较稳定,控制品质良好.

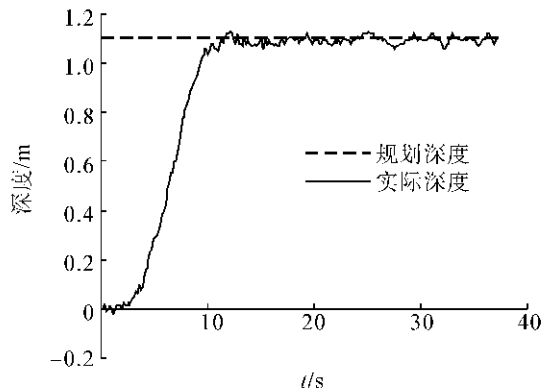


图5 T-S/SSC定深曲线

Fig.5 Curves of T-S/SSC dept control

5.2 自然水域实验

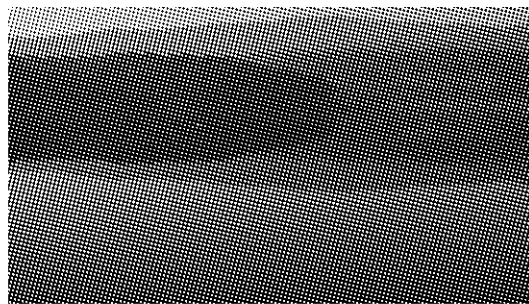


图6 定深控制试验场区

Fig.6 Experiment area of dept control

为检验自然水域中的控制效果,如图6所示,湖

中白色浮标下系一声反射体于水下。“微龙-1”初始在水面航行,并且对准目标.得到指令后,下潜,定深4 m水下潜航.利用艏部的前视图像声呐获取目标声学图像.

采用分段整定过的S面参数,并利用T-S拟合各曲面得到控制器.将深度控制映射为纵倾控制进行定深试验,试验数据曲线如图7所示.定深控制满足实验要求.但从图中可以看出,系统响应较慢.这是因为定深声学探测水下目标时,要求航速较低,翼效不高造成的.

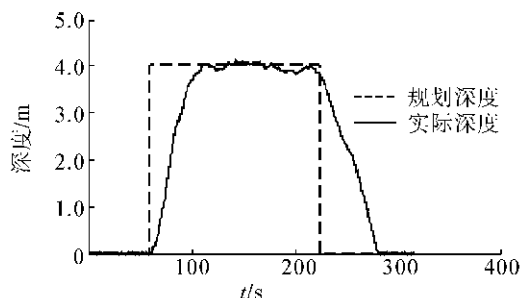


图7 T-S/SSC定深4 m数据曲线

Fig.7 Data curves of dept 4 m control by T-S/SSC

采用T-S曲面拟合算法设计的运动控制器在黑龙江省镜泊湖和湖南省白鹭湖分别进行了试验.图8是在黑龙江省镜泊湖航行实验的现场数据.图9是在湖南省长沙市白鹭湖航行实验的现场数据.由于湖试时间的限制,经典的固定参数S面控制器参数和未拟合的分段控制方法并未在实验中尝试.从图中规划深度和实际深度的比较来看,控制器跟踪性能良好,满足工程需要.

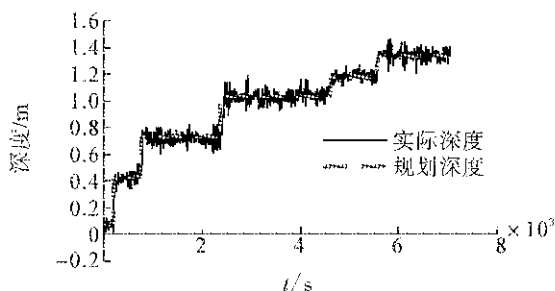


图8 镜泊湖深度控制跟踪曲线

Fig.8 Depth control curves in Jingbo lake

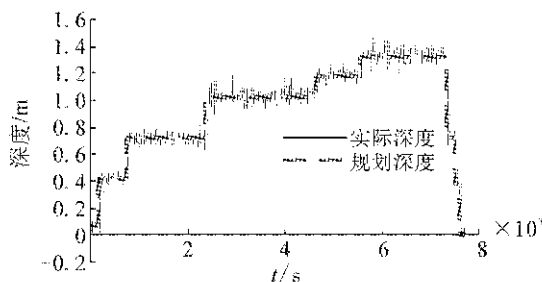


图9 白鹭湖深度控制跟踪曲线

Fig.9 Depth control curves in Bailu lake

图10是根据GPS接收到的位置信息得到的白鹭湖中长距离航行试验的路线。“微龙-1”在不更换能源的情况下,航行12.1 km.为了便于监测,长航没有大深度地下潜,是在近水面进行.湖中试验表明,“微龙-1”在实际水域中有较好的适应性和航行能力,具备在一定航速下定深定向航行的能力.

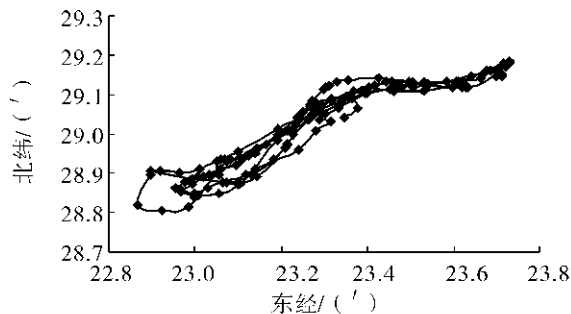


图10 白鹭湖长距离航行试验路线

Fig.10 Long distant navigation path in Bailu lake

6 结束语

针对不同航速段采用不同最优控制参数带来的分段控制边界层系统跳变的情况,采用T-S模型对分段函数进行了曲面光滑拟合.这种方法既保证了变参数S面控制的控制效果,又考虑了系统输出的稳定性.仿真、水池和自然水域实验均证明了算法的有效性.本文只是依据经验划分了拟合的分段区间,关于分段区间的合理性,应深入研究水下机器人水动力学原理.这也是需要进一步研究的内容.

参考文献:

- [1] LI Ye, LIU Jiancheng, SHEN Mingxue. Dynamics model of underwater robot motion control in 6 degrees of freedom[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2005, 12(4): 456-459.
- [2] 刘学敏, 徐玉如. 水下机器人运动的S面控制方法[J]. 海洋工程, 2001, 19(3): 81-84.
LIU Xuemin, XU Yuru. S control of automatic underwater vehicles[J]. Ocean Engineering, 2001, 19(3): 81-84.
- [3] 刘建成, 于华南, 徐玉如. 水下机器人改进的S面控制方法[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2002, 23(1): 33-36.
LIU Jiancheng, YU Huanan, XU Yuru. Improved S plane control algorithm for underwater vehicles[J]. Journal of Harbin Engineering University, 2002, 23(1): 33-36.
- [4] 王丽荣. 水下机器人控制系统故障诊断研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2006.
WANG Lirong. Research on fault diagnosis for AUV control system[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2006.
- [5] 刘建成. 水下机器人推进系统故障诊断与容错控制研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2004.

LIU Jiancheng. Research on fault diagnosis and fault tolerant control for actuator of AUV[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2004.

- [6] 郭冰洁, 徐玉如, 李岳明. 水下机器人S面控制器的改进粒子群优化[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2008, 29(12): 1277-1282.

GUO Bingjie, XU Yuru, LI Yueming. S surface controller for underwater vehicles using particle swarm optimization[J]. Journal of Harbin Engineering University, 2008, 29(12): 1277-1282.

- [7] LI Ye, ZHANG Lei, WAN Lei, et al. Autonomous underwater vehicle S-surface controller optimization[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2008, 15(3): 404-410.

- [8] HO D W C, SUN Jitao. Stability of Takagi-Sugeno fuzzy delay systems with impulse[J]. IEEE Transaction on Fussy Systems, 2007, 15(5): 784-790.

- [9] PANG C T, LUR Y Y. On the stability of Takagi-Sugeno fuzzy systems with time-varying uncertainties[J]. IEEE Transaction on Fussy Systems, 2008, 16(1): 162-170.

作者简介:



庞永杰,男,1955年生,教授,博士生导师,第三、四届海洋工程学会理事. 主要研究方向为水下机器人总体设计与运动控制技术. 目前主持和参与省部级以上科研项目8项,获得国家科技进步二等奖1次,国防科学技术一、二、三等奖各一次. 发表学术论文50余篇.



李 晔,男,1978年生,副教授. 主要研究方向为水下机器人规划与运动控制技术. 目前参与省部级以上科研项目4项,发表学术论文20余篇.

2009 年全国人工智能大会(CAAI-13)

2009 China National Conference on Artificial Intelligence(CAAI-13)

2009 年 10 月 25 - 28 日, 北京

<http://caai.cn/caai-13>

为了总结中国人工智能学会 CAAI-12 以来人工智能科学技术的新进展,交流我国科技工作者在该领域的自主创新成就,推动人工智能及相关学科的理论研究和科技成果转化,中国人工智能学会决定于2009年10月25-28日在首都北京召开第13届全国学术大会(CAAI-13). 本届大会由北京航空航天大学承办,北京邮电大学、北京科技大学、北京理工大学、北京大学、清华大学、北京交通大学、北京工商大学、首都师范大学、北京工业大学等协办.

本届大会将邀请著名科学家做高等智能(含脑科学、认知科学、人工智能)前沿报告,举办讲座和专题讨论会,组织机器人足球、中国象棋机器博弈的竞赛和演示. 欢迎中国人工智能学会会员及相关领域的研究人员、高校师生、企业家、工程技术人员以及一切爱好和有志于智能科学技术事业的朋友踊跃投稿.

重要日期:

征文截止日期:2009 年 7 月 20 日

录用通知日期:2009 年 9 月 1 日

出版清样日期:2009 年 9 月 20 日

优惠注册日期:2009 年 9 月 25 日前

联系方法:

程序方面: E-mail: caai@bupt.edu.cn

联系人: 邹亚茹 电话: 010-62281360 传真: 010-62282983

会务方面: E-mail: caai_13@126.com

联系人: 刘 杨 (13581731641)、孟德元 (13488684523)