

文章编号:1005-9865(2001)03-0081-04

水下机器人运动的 S 面控制方法

刘学敏, 徐玉如

(哈尔滨工程大学 船舶与海洋工程系, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘 要: 由于水下机器人的强非线性以及系统存在不确定性, 同时考虑到港湾环境下水声信号的噪声大, 因此, 水下机器人进行精确作业时的运动控制一直是其实用化过程中困扰人们的问题。通常水下机器人的控制方式有 PID 控制器, 神经网络控制器和模糊逻辑控制器三种。但是, 由于这三种方法在实际应用中都存在一些参数难以确定的缺陷, 为了解决这一问题, 本文从模糊逻辑控制方式出发, 借鉴 PID 控制的结构形式, 推导出一种全新而简单有效的控制方法, 定义为 S 面控制法。从水下机器人的水池试验和海上实验来看, 不论是定点的控制精度还是运动过程中的控制效果都较令人满意, 尤其是在风浪、潮流都比较大的海上实验中得到验证, 鲁棒性很好。

关键词: 水下机器人; Sigmoid 曲面函数; 神经网络控制; 模糊控制; S 面控制

中图分类号: TP24; P754.3

文献标识码: A

S control of automatic underwater vehicles

LIU Xue-min, XU Yu-ru

(Dept. of Naval Architecture and Ocean Eng., Harbin Engineering University, Harbin 150001, China)

Abstract: Owing to the nonlinearity of automatic underwater vehicles (AUV), many uncertainties of the system, big noises of sensors in the harbor, and the precise control of AUV in some intelligent operations have been puzzling us in the application of AUV. There are three common methods, i.e. PID control, neural control and fuzzy control, but all of them have different limitations. Based on the analysis of fuzzy control, combined with the form of PID control, we have obtained a new control method (named S control) to resolve this problem. In the pool and sea experiments, we find that the precision of position and the performance of control are all satisfying.

Key words: automatic underwater vehicles; sigmoid function; neural control; fuzzy control; S control

水下机器人的动力学系统是非线性的、时变的, 其水动力系数通常很难准确估计或由试验测定, 而且, 各个自由度的运动相互耦合, 其耦合情况既难以定性描述, 更难以定量表达。甚至在很多情况下, 给定的任务要求机器人负载可变, 例如铺设管道, 布雷, 援潜救生等。变化的负载以及变化的海洋环境使机器人的质量、质心、浮心等发生变化。水下机器人在海洋中航行, 将受到各种干扰因素的影响。在深水中, 近海底或靠近障碍物时, 其所受到的水动力各不相同。复杂的海洋环境有风、浪和流, 对于深水航行的水下机器人来说, 海流的影响是很大的, 而风和浪一般不加以考虑。海流是一个未知的或无法预先由人输入的参数, 而且直接测量海流是十分困难的。总之, 水下机器人是一个强非线性系统, 而且考虑到运动的时变性、环境的复杂性和不确定性, 建立精确的水下机器人运动模型是不可能的, 也是不现实的。所以, 水下机器人控制系统的设计必须考虑非线性问题, 同时, 从加强机器人的自主性与适应性, 从改善机器人工作性能的观点来看, 控制系统还应该具备良好的自适应与自学能力。水下机器人的运动控制器通常有 PID 控制器, 神经网络控制器和模糊逻辑控制器三种, 由于水下机器人的非线性很强, 因此更多的研究人员把注意力和精力放在神经网络和

收稿日期: 2000-10-20

作者简介: 刘学敏(1975-)男, 江西寻乌人, 博士生, 主要从事智能潜器运动仿真与控制的研究。

模糊逻辑控制技术上,从实验效果来看,对于水下机器人的运动控制,神经网络和模糊逻辑控制技术具有优越性,而且某些实验的结果也是令人满意的。

神经网络控制^[1-3]的优点是充分考虑到了水下机器人的强非线性和各个自由度之间的耦合性,同时其学习机制也能够跟踪系统自身或外围环境的缓慢变化,在以往的水池和湖试验中都取得了成功。其缺点是结构和参数不易确定,要求设计人员在这方面具有丰富的知识和实际经验,而且,当环境变化比较剧烈如在波浪中或是涨潮退潮时的港湾中(存在较大的环流),外界干扰的幅度和周期跟水下机器人自身的运动幅度和周期相近,神经网络的学习就出现明显的滞后现象,其控制很容易发生振荡。

模糊控制器^[4,5]的设计比较简单实用,而且稳定性也较好。然而,对于水下机器人,人们不太可能得到较好的操纵经验,因此其隶属度函数的设定、推理方法和反模糊化方法以及模糊规则的获取存在相当的难度。而这些参数设计的好与坏,又将直接影响到控制的效果。所以,参数调整的复杂度制约了模糊控制技术在水下机器人运动控制中的应用。

事实上,模糊逻辑控制和 PID 控制有相似之处,能否将两者结合在一起构造一个新型的控制器,以简化控制器的设计,同时又能保证控制效果,就成为本文研究的重点。

1 S 面控制器

首先,根据常规模糊控制器的控制规则^[6](见表 1)可以看出,控制输出的变化是有规律可循的。这里取主对角线数值连成折线,如图 1。对于这样的折线,可以用一条光滑曲线(一个 Sigmoid 函数)来拟合,事实上,光滑曲线可以看作无数条长度趋向于零的折线相连。在设计模糊控制器的时候,通常采用的是两边疏松、中间密的形式(即偏差大时控制得比较粗,而偏差小时控制得比较细),这一点与 Sigmoid 函数的变化形式是一致的,因此, Sigmoid 函数在一定程度上体现了模糊控制的思想。同理,整个模糊控制规则库对应的折线面,也就可以用光滑曲线的曲面来代替。

一般地, Sigmoid 曲线函数为:

$$y = 2.0 / (1.0 + e^{-kx}) - 1.0 \quad (1)$$

那么, Sigmoid 曲面函数为:

$$z = 2.0 / (1.0 + e^{(-k_1x - k_2y)}) - 1.0 \quad (2)$$

因此,本文设计的 S 面控制器的控制模型为:

$$u = 2.0 / (1.0 + e^{(-k_1e - k_2\dot{e})}) - 1.0 \quad (3)$$

其中, e 和 $\dot{e}$ 为控制的输入信息(偏差和偏差变化率,通过归一化处理); u 为控制输出;这里为各个电机的电压指令; k_1 和 k_2 分别为对应偏差和偏差变化率的控制参数,可以改变其对应自由度的变化速度。

可以看出, S 面控制器在方程的形式上和 PD 控制很相似,只不过后者是线性的,前者是非线性的。当然,采用非线性函数来拟合非线性系统比采用线性函数更好一些。

图 2 的三维光滑曲面表达了偏差、偏差变化率与控制力之间的关系,当偏差、偏差变化率大的时候,其控制力也大;而偏差、偏差变化率小的时候,控制力也小,最终达到偏差、偏差变化率和控制力都为零的状态。可以看出,在偏差、偏差变化率变化的过程中,由于实际运动的平滑性,控制力的输出也是平滑的,而且,其作用是减小偏差和偏差变化率,同时,也是减小控制力本身的大小。当然,从控制函数的形式和图形也可以看出, S 面控制器不具备局部调整功能,因此,其局部性能不如模糊控制。但是,正如前述,对于水下机器人的模糊控制器,其参数的选择和调整难度较大,同时考虑到对象模型的复杂度和模糊控制在理论上的不成熟,应用模糊控制技术远不是语言规则描述那样简单。因此,更多地关注控制过程的全局性,希望控制过程比较平滑、超调小、收敛速度比较快,而且控制精度满足智能作业的要求。通过修改 S 面控制器的控制参数,可以调整控制器的全局控制性能,以实现超调小,满足控制精度等作业要求。当然,由于 S 面控制器不具备局部调整功能,为了满足超调小、定位点控制精度高的要求,就有可能降低控制的响应速度。当然,即使是采用模

表 1 控制规则表

Tab.1 Control rules

4	3	2	1	0
3	2	1	0	-1
2	1	0	-2	-2
1	0	-1	-2	-3
0	-1	-2	-3	-4

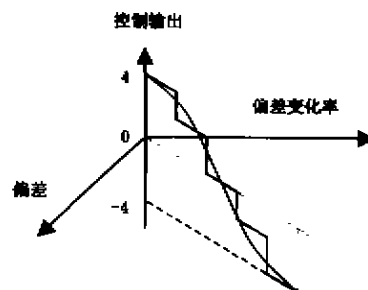


图 1 Sigmoid 曲线

Fig.1 Sigmoid curve

糊控制,由于系统的复杂度和设计人员经验知识的缺乏,其控制效果往往与期望的相去甚远。

这样就找到了一种简单而又普遍适用的控制规律。不过,由于控制对象的运动性能千变万化,控制的效果也就大不相同。理想的状态是,从控制面的任何一点出发,其控制运动的方向应该是指向控制平衡点(零点)的梯度下降方向,这样的运动是最优的。但是,任何一个控制对象的特性都会与设计的控制面有所差别,因此,实际的控制运动是偏离最优方向的。所以,在设计某个对象的控制面时,应该通过调整控制参数的数值,尽可能地逼近对象的控制特性。

1) 选择参数。

从控制模型的公式来看,其控制参数只有两个(k_1 和 k_2),其需要调整的量就比模糊控制简单得多。

当然,S面控制器也存在比例因子,由于机器人的运动速度和推进能力大小通常是可以得到的,获得其对应的比例因子并不难,因此,类似于模糊控制,比例因子是比较好确定的,这里不作讨论。通过改变 k_1 和 k_2 的大小可以调整偏差和偏差变化率在控制输出中所占的比重,从而调节控制的超调和收敛速度以满足作业的要求。一般地,如果要求控制的偏差和偏差变化率属于负大的隶属度均为1时,控制输出属于正大的隶属度为1,为了保证1%以内的误差,由公式(3)可以确定 k_1 和 k_2 的值应该选择在3.0大小左右。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 。在实际的控制中,还可以通过变论阈方法来提高定位点的控制性能。

2) 参数的自调整方式。

参数调整的方式有人工调整和自适应调整(自适应机制是一大难点)。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,没有局部调整功能。因此,无论如何这里的参数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,使得任何一种方式的逼近都有很大的余地。

人工调整:调整 k_1 和 k_2 的大小,使得在一般情况下水下机器人的运动控制满足要求。

自适应调整:对于浮力的变化及海流等因素,可以考虑成一段时间内的固定干扰力,这样就可以通过调整S面的偏移,来达到消除固定偏差的目的,即采用控制模型函数: $u = 2.0 / (1.0 + e^{(-k_1 e - k_2 \dot{e})}) - 1.0 + \Delta u$, 其中 Δu 为通过自适应方式得到的固定干扰力的大小(归一化),自适应方式如下:

- a) 判断机器人的运动速度是否小于一个设定的阈值,如果是,转 b), 如果不是,转 c);
- b) 将该自由度的偏差值赋予一个设定的数组,同时将设定的计数值加1,当该计数值达到一个预定的定值时,转 d);
- c) 将数组的值往前串一位,同时计数值减1,转 a);
- d) 对这一数组的数值加权平均,得到的平均偏差值用于计算控制输出的偏移量,自适应调整控制器的输出,以消除固定偏差,同时将计数值和数组归零,进行下一个循环。

2 水下机器人的海上实验结果

实验场地选择在水深7~9m的港湾,周围环境噪声较大,潮位落差4m左右,风力最大达到7级。由于是在港湾中,流场很乱,流的大小无法测量。考虑到港湾中的潮汐流和环流较严重,环境对声传感器有较大的干扰,因此对控制器的稳定性要求比较高。

图3所示是水下机器人在海上搜索目标时的一段实验数据。运动目标曲线(折线)由搜索策略决定,实际运行轨迹(曲线)是该控制器的控制结果。一开始,机器人从起点出发,根据声视觉的传感信息引导机器人的规划运动,而本文设计的控制器便是根据规划的运动点以及自身的运动速度解算控制指令,并将控制指令传送给执行器,从而使得水下机器人跟随规划的目标运动,并最终到达声视觉搜索到的实物目标,例如雷、梯子等等。由于当前执行的是搜索作业,这时机器人的航速设置比较低,航速可以达到1节。

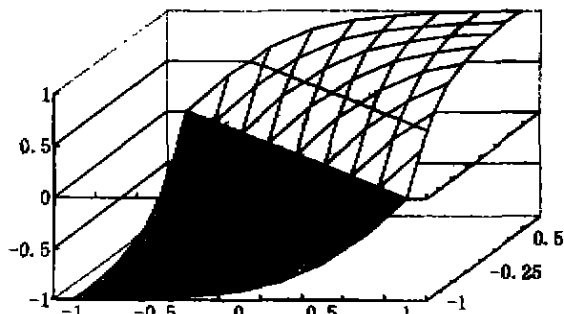


图2 Sigmoid 曲面

Fig.2 Sigmoid curve surface

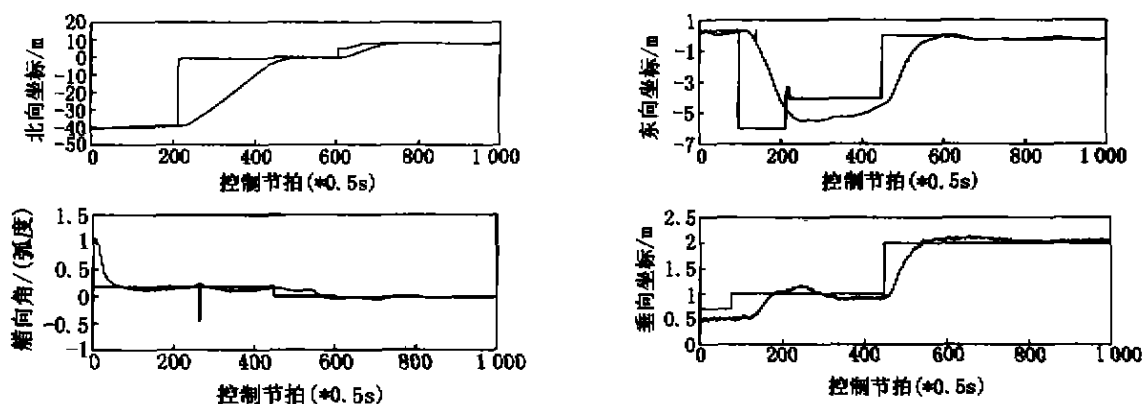


图 3 水下机器人海上实验结果

Fig.3 Experiment results of AUV in sea

从图中可以看出,控制效果满足工程需要。

3 结 语

与 PID 控制器不同的是, S 面控制法采用非线性函数来拟合具有强非线性特性的控制对象, 控制效果好于 PID 控制器, 而且本文提出了一种简便的消除固定干扰力的自适应方式, 可以有效地提高机器人在定位点作业的控制精度; 跟神经网络控制相比, S 面控制法的稳定性明显好于前者, 而且从自适应角度来看, 虽然神经网络的学习是全方位的, 但正因为其学习机制是全方位的, 信号的噪声干扰以及近似等幅度或等周期的干扰都极有可能造成学习的振荡甚至发散, 因此在比较恶劣情况下神经网络的控制效果不理想; 跟模糊控制相比, S 面控制法没有局部调整功能, 但其结构设计和参数调整都更加简单实用, 而且 S 面控制法体现出来的控制思想和模糊控制是吻合的。因此, S 面控制方法具有一定的实用性, 从试验的结果来看, 控制效果可以满足作业要求。

当然, S 面控制和 PID 控制、模糊控制一样存在不好解决运动耦合的问题, 因此, 如何解决各个自由度之间的耦合性, 将是以后研究的一个重点。

参考文献:

- [1] 彭 良, 卢迎春, 万 磊, 等. 水下智能潜器的神经网络运动控制[J]. 海洋工程, 1995, 13(2): 38-46.
- [2] T Fujii, T Ura. Control with neural network for autonomous underwater vehicle[J]. J. Soc. Naval Arch. Japan, 1989, 166: 503-511.
- [3] J Yuh. A neural net controller for underwater robotic vehicles[J]. IEEE J. Oceanic Eng., 1994, 15(3): 161-166.
- [4] 尚 游, 徐玉如. 基于模糊逻辑的智能水下机器人运动控制技术的研究[A]. 中国第五届机器人学术会议论文集[C]. 1997.
- [5] X Liu, L Peng, J Li, et al. Obstacle avoidance using Fuzzy neural networks[A]. Proceedings of the 1998 International Symposium on Underwater Technology[C]. 1998: 272-285.
- [6] 龙升照, 汪培庄. Fuzzy 控制规则的自调整问题[J]. 模糊数学, 1982, 3: 105-112.