

# 自治水下机器人自适应滑膜控制\*

吴宝举<sup>1,2</sup> 李硕<sup>1,2</sup> 王晓辉<sup>1</sup>

(<sup>1</sup>中国科学院 沈阳自动化研究所 沈阳 110016)(<sup>2</sup>中国科学院 研究生院 北京 100039)

Adaptive sliding mode control of an autonomous underwater vehicle

WU Bao-ju<sup>1,2</sup> LI Shuo<sup>1,2</sup> WANG Xiao-hui<sup>1</sup>

(<sup>1</sup>Shenyang Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China)

(<sup>2</sup>Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**【摘要】**对影响自治水下机器人控制性能的因素进行分析,提出将自适应滑膜控制方法应用于水下机器人的深度控制,使其在各种干扰的条件下仍保持稳定且具有满意的性能。采用系统辨识的方法得到系统的模型,进而通过辨识得到的模型修正滑膜控制量。引入平滑饱和函数,改善控制的暂态品质和震颤现象。仿真结果表明控制算法的有效性。

**关键词:**自治水下机器人;离散时间;滑膜控制;自适应控制

**【Abstract】** It presents an adaptive sliding mode controller for an autonomous under water vehicle (AUV) in the presence of parameter uncertainties and external disturbance. This controller is a discrete time sliding mode controller based on a state space model. The proposed algorithm has a time varying sliding surface which is obtained by parameter estimation method. A smooth saturation function which maintains system having same stable condition is used to reduce the control chatter and transient performance of system. The presented algorithms have been applied to the problem of depth control of an AUV. Resulting performances have been tested by simulation.

**Key words:** AUV; Discrete-time; Sliding mode control; Adaptive control

中图分类号:TH16;TP242 文献标识码:A

## 1 引言

自治水下机器人的控制性能受多种因素的影响,模型不确定性、水动力耦合、系统非线性等等。把自适应滑膜控制方法应用于水下机器人的深度面控制。首先,描述离散时间直接滑膜控制方法,然后把滑膜控制方法与自适应控制方法相结合形成自适应滑膜控制。这种控制方法把两种控制方法的各自特点相结合,它不需要精确的对象模型,对模型偏差和外部干扰具有鲁棒性。

传统的滑膜控制方法大都在连续空间设计,但是控制算法基本工作在离散空间,连续空间设计的滑膜控制在实际应用时会产生比较大的震颤甚至不稳定。直接在离散空间设计自适应滑膜控制方法,便于工程应用。控制系统结构如图1所示。

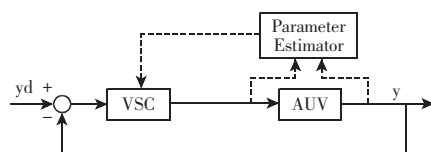


图1 自适应滑膜控制结构图

## 2 动力学模型

建立自治水下机器人模型时假设机器人做定速巡航,不考虑模型的非线性和水平面与垂直面间的耦合影响。根据牛顿第二定律:

$$\begin{aligned} m(\dot{w}-u_0q) &= Z \\ I_y\dot{q} &= M \end{aligned} \quad (1)$$

升沉力和俯仰力矩表达如下:

$$Z=Z_w\dot{w}+Z_q\dot{q}+Z_w w+Z_q q+Z_\delta\delta \quad (2)$$

$$\begin{aligned} M &= M_w\dot{w}+M_q\dot{q}+M_w w+M_q q-mg(z_c-z_B)\sin\theta+M_\delta\delta \\ &\approx M_w\dot{w}+M_q\dot{q}+M_w w+M_q q-W\overline{BG}_z\theta+M_\delta\delta \end{aligned} \quad (3)$$

稳定状态下有:升沉速度  $W$  非常小,所以有  $\theta_0=q_0=\phi_0=0$

$$\dot{\theta}=q \quad z=-\theta u_0+w \quad (4)$$

稳定状态下有:升沉速度  $W$  非常小,所以有:

$$\begin{bmatrix} \dot{q} \\ \dot{\theta} \\ \dot{z} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} M & -\overline{BG}_z w & 0 \\ I_y - M_q & I_y - M_q & 0 \\ 0 & 0 & -u_0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} q \\ \theta \\ z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} M_\delta \\ I_y - M_q \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \delta_s \quad (5)$$

把模型写成状态空间的通用形式:

$$x(k+1)=Ax(k)+Bu(k)+d \quad (6)$$

其中,

$$A = \begin{bmatrix} -a_1 & -a_2 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & -u_0 & 0 \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$B = \begin{bmatrix} b \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$x=[q \ \theta \ z]^T \quad (9)$$

式中:  $U$ —垂直舵输入量;  $D$ —外部干扰力向量。根据这个简化模型设计控制率。

由状态空间模型(6)得到纵倾角  $\theta$  的输入输出模型:

$$y(k+2)=-a_1y(k+1)-a_2y(k)+bu(k)+d \quad y=\theta \quad (10)$$

参数  $\mu_1$   $\mu_2$  和  $b_v$  随机器人航速的变化而变化。由于干扰耦合,未建模动态的影响,需要鲁棒控制。

### 3 离散滑膜控制器设计

本节描述离散时间滑膜控制器设计。单输入多输出离散模型描述为:

$$x(k+1)=A(k)x(k)+B(k)u(k) \quad (11)$$

$x(k)$  是  $n$  维状态向量  $u(k)$  是标量代表控制输入。假设  $B(k)$  是已知常量矩阵  $A(k)$  表示为已知量  $A_0$  和未知量  $\Delta A$ 。

设未知量  $\Delta A$  满足匹配条件:

$$\Delta A=Bd(k)^T \quad (12)$$

$$d(k)=[d_{k1} \ d_{k2} \ \dots \ d_{kn}]$$

假设未知部分有界且其上界已知。定义向量:

$$D^T=[D_1 \ D_2 \ \dots \ D_n] \quad (13)$$

$W$  气质  $D_i$  是正常数,满足如下条件:

$$D_i > |d_{ki}| \quad k=1 \ 2 \ \text{to} \ n \quad (14)$$

若给出需要跟踪的参考轨迹  $r(k)$  则误差向量表示为:

$$e(k)=x(k)-r(k) \quad (15)$$

滑动开关超平面定义为:

$$s(k)=G^T e(k) \quad (16)$$

系数  $G^T$  满足在滑动超平面  $s(k)=0$  上系统稳定

系统控制量由两部分组成,等效控制量,开关控制量。开关控制量用于保证系统状态趋近于超平面。

在离散用条件

$$s(k+1)=s(k) \quad (17)$$

来计算等效控制量。这一条件类似于连续空间条件  $\dot{s}=0$ 。求得等效控制量为:

$$Ue(k)=\alpha^{-1}G^T\Delta r(k+1)-\alpha^{-1}G^T(A_0-I)x(k)+k\text{sign}(s(k)) \quad (18)$$

$$\text{其中 } \alpha=G^TB \text{ 和 } r(k+1)=r(k+1)-r(k) \quad (19)$$

开关控制量保证系统跟踪参考轨迹,并使状态向量保持在超平面上。控制量写成:

$$u_k(k)=\alpha^{-1}G^T\Delta r(k+1)-\alpha^{-1}G^T(A_0-I)x(k) \quad (20)$$

$$k > D^T|x|$$

前两项是等效控制量,最后项是开关控制量。

证明:

滑膜存在条件表示为:

$$s(k)\Delta s(k+1) < 0 \quad (21)$$

$$\begin{aligned} \Delta s(k+1) &= s(k+1) - s(k) \\ &= G^T\Delta A x(k) + G^TBK\text{sign}(s(k)) \end{aligned} \quad (22)$$

$$= G^T\Delta Bd(k)x(k) + G^TBK\text{sign}(s(k))$$

$$\leq G^TB(D^T x(k)) + K\text{sign}(s(k))$$

其中  $k > D^T|x|$  所以

$$s(k)\Delta s(k+1) < 0 \quad (23)$$

开关控制量的上界保证系统的稳定性。

用饱和函数来减小系统抖动和提高输出相应特性。

$$\text{sat}(s/\Delta) = \begin{cases} 1 & s > \Delta \\ ks & |s| < \Delta \\ -1 & s < -\Delta \end{cases} \quad k=1/\Delta \quad (24)$$

### 4 自调整滑膜控制

上节设计的算法假设,参数  $a_1$   $\mu_2$  和  $b$  已知且变化缓慢。这一假设并不总是满足。若系统参数未知或变化很大,控制系统可能颤抖很厉害甚至不稳定

这一问题可通过系统辨识的方法解决

本文用带死区修正的最小二乘方法估计系统的未知参数。

$$\hat{\theta}_k = [a_1 \ \mu_2 \ b] \quad (25)$$

$$\hat{\theta}_{k+1} = \hat{\theta}_k + K_k \alpha(k) (y_{k+1} - q_{k+1} \theta_k) \quad (26)$$

$$K_k = P_k q_{k+1}^T (\rho + q_{k+1} P_k q_{k+1}^T)^{-1} \quad (27)$$

$$P_{k+1} = (I - K_k q_{k+1}^T) P_k / \rho \quad (28)$$

$$\alpha(k) = \begin{cases} 1 & |y_{k+1} - q_{k+1} \theta_k| > g \\ 0 & |y_{k+1} - q_{k+1} \theta_k| < g \end{cases} \quad (29)$$

死区  $g$  根据传感器噪声来确定

自治水下机器人垂直面模型(10)的参数由  $\hat{\theta}_k$  更新。

### 5 仿真

本节把上述控制方法应用于自治水下机器人的深度控制。系统的不确定性主要有:传感器噪声,耦合,环境干扰,航速变化引起的参数变化。开关增益和干扰表达为  $G^T=[1 \ 0.3 \ 0.3]$  和  $D^T=[5 \ 5 \ 5]$ 。辨识器参数  $\rho=0.99$   $\alpha(k)=1$ 。开关增益  $K=15$ 。

系统参数变化和受到环境干扰时的深度和纵倾角响应曲线,如图2、图3所示。期望深度10m。仿真时间50s。在第25s系统参数产生25%的变化,并且外界环境造成深度游0.5m的变化。

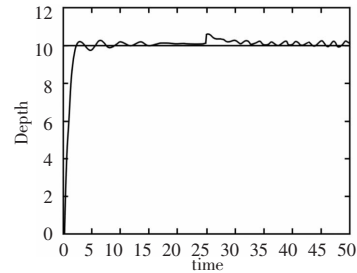


图2 深度响应曲线

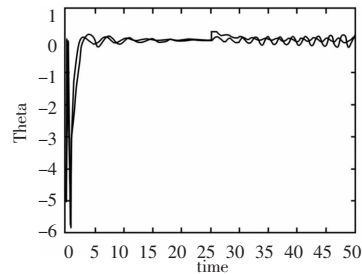


图3 纵倾角响应曲线

从仿真结果可以看出自适应滑膜控制器保证系统在模型参数变化和存在外部干扰的条件下具有良好的性能。

### 6 结论

提出一种把自适应控制和滑膜控制相结合的控制方法,即可以补偿系统的结构不确定性又对非结构不确定性具有强鲁棒性。把此方法应用于自治水下机器人的深度控制。仿真结果表明了系统的精确性和鲁棒性。

#### 参考文献

1 A.J. Healey and D. Lienard. Multivariable Sliding Mode Control for Au

# 基于 PLC 的机器人制孔执行器控制系统设计\*

员俊峰 姚艳彬 宗光华

(北京航空航天大学 机器人研究所 北京 100191)

The design of robot drilling end effector control system based on PLC

YUAN Jun-feng, YAO Yan-bin, ZONG Guang-hua

(Robotics Institute, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China)

**【摘要】**针对应用于飞机铝合金、钛合金以及叠层部件自动制孔的机器人制孔执行器,基于 PLC 开发了一套机器人制孔执行器控制系统。根据需要完成的工作任务的要求和特点,详细分析和设计了控制系统的总体框架、硬件模块、软件模块以及上位机界面模块。现场测试证明,该控制系统操作方便、性能稳定,能够极大提高飞机部件的制孔效率和装配质量。

**关键词** PLC 机器人制孔执行器 控制系统

**【Abstract】** The control system of the robot drilling end effector was developed based on PLC. The robot drilling end effector can drill the titanium alloy, aluminum alloy and laminated composites component of the aircrafts. The whole framework, hardware module, software module and interface module were designed and analyzed in detail according to the requirement and characteristic of the task. The testing on-site proved that the control system was stable and easy to use, and can increase the drilling efficiency and assemble quality of the aircraft component immensely.

**Key words** PLC Robot drilling end effector Control system

中图分类号:TH16,TP24 文献标识码:A

## 1 引言

孔加工在航空制造中占有重要地位,有文献报道在一条机翼的装配线上每年约要钻削加工 4000 万个孔<sup>[1]</sup>。传统的人工钻孔,工作量大,过程枯燥,钻孔的效率低,孔的质量难以保证一致性,批量化生产人力和物力成本高。由于机器人制孔系统一般采取工件不动机器人移动的方式,其灵活性较好,且对工件的适应性较好,同时能够极大的提高制孔效率和精度,在国外已得到广泛的研究和应用。美国 EOA 公司与波音公司也联合生产研制了一种机器人多功能钻削系统(EOA),该系统可以完成对钛合金、铝合金、复合材料以及叠层等飞机蒙皮的钻孔、铤孔和绞孔<sup>[2]</sup>。美国 Electroimpact 公司与英国空客公司联合设计了一套机器人自动钻削系统(O.N.C.E),O.N.C.E 系统主要用于波音 F/A-18E/F 的机翼后缘襟翼的钻孔和铤孔<sup>[3]</sup>。

而国内对于机器人制孔系统的研发尚处于起步阶段,机器人制孔系统的关键是开发高精度、高效率的多功能制孔执行器,其中多功能制孔执行器控制系统的设计对于系统的整体性能的实现具有重要的作用。主要就应用于飞机钛合金、铝合金大型壁板制孔的多功能制孔执行器,设计并开发了基于上位机和 PLC 的多功能制孔执行器控制系统。

## 2 制孔执行器的基本组成

制孔执行器由切削运动单元、压紧单元、传感单元、支承单元组成。切削运动单元提供制孔过程中必须的主轴转动和进给运动,压紧单元提供压紧力,用于保持制孔执行器与工件之间的位置关系,支承单元一方面为钻孔末端执行器上的组件提供必要的连接和支承,另一方面提供和工业机器人的连接。制孔执行器实体图如图 1 所示。

\* 来稿日期:2009-09-10 \* 基金项目:国家科技支撑计划项目(2007BAF27B03)

1 G. Antonelli, S. Chiaverini, N. Sarkar et al. Adaptive Control of an Autonomous Underwater Vehicle. Experimental Results on ODIN. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2001, 9(5): 756-765

2 Pan-Mook Lee, Seok-Won Hong, Yong-Kon Lim. Discrete-time quasi-sliding mode control of an autonomous underwater vehicle. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 1999, 14(3): 388-395

3 discrete adaptive variable structure controller for mimo rov. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 1997, 5(3): 349-359

4 R.Cristi, A.P.Fotis and A.J.Healey, "Adaptive sliding mode control of au-

tonomous Diving and Steering of Unmanned Underwater Vehicles. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 1993, 18(3): 327-339

5 G. Antonelli, S. Chiaverini, N. Sarkar et al. Adaptive Control of an Autonomous Underwater Vehicle. Experimental Results on ODIN. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2001, 9(5): 756-765

6 蒋新松, 封锡盛等. 水下机器人. 沈阳: 辽宁科学技术出版社, 2000

7 Healthy, A. Lienard, D. Multivariable sliding mode control for autonomous diving and steering of unmanned underwater vehicles. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 1993, 18(3)

8 L.Ljung. System Identification Theory for the User. Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall, 1987

9 D.W. Clarke et al. Generalized Predictive Control-Part I. The Basic Algorithm. Automatica, 1987, 23(2): 137-148

10 陈厚泰. 潜艇操纵性. 北京: 国防工业出版社, 1981(6): 68