

文章编号: 1002-0446(2003)02-0163-04

水下机器人推力器容错控制技术的研究

刘建成 万磊 戴捷 庞永杰

(哈尔滨工程大学 船舶工程学院 哈尔滨 150001)

摘要: 为保证自主式水下机器人在高压、可见度差的未知海洋环境下顺利完成作业任务,必然要求水下机器人具有容错控制能力. 本文主要以哈尔滨工程大学研制的“智水Ⅲ”型水下机器人为对象,探讨水下机器人推力器容错控制技术. 文中先给出在正常情况下水下机器人的解耦控制器及推力分配,然后给出了在推力器出现故障时的容错控制策略. 仿真结果表明,该控制器及容错控制策略都能达到很好的控制精度.

关键词: 自主式水下机器人;容错控制;解耦控制

中图分类号: TP24 **文献标识码:** B

THRUSTER FAULT-TOLERANT CONTROL OF AN AUTONOMOUS UNDERWATER VEHICLE

LIU Jian-cheng WAN Lei DAI Jie PANG Yong-jie

(College of Naval Architecture Eng. Harbin Engineering University, Harbin 150001)

Abstract: In order to insure that autonomous underwater vehicle completes the tasks successfully in unstructured and hazardous oceanic environment with the high pressure and low visibility, an efficient and effective fault-tolerant control system becomes imperative for AUVs. This paper discussed thrust fault-tolerant control technology for ZHISHUI Ⅲ AUV, designed at Harbin Engineering University. A decoupling controller and an approach to the allocation of thruster forces of an AUV are investigated first, then a fault-tolerant control approach under thruster fault is given. Results from computer simulation show that the precision of the fault-tolerant control approach is satisfactory.

Keywords: autonomous underwater vehicle, fault-tolerant control, decoupling control

1 引言(Introduction)

近些年来,由于海洋资源开发与海洋环境探索的迫切需求促进了水下机器人及其相关技术的迅速发展. 时下常见的水下机器人包括远程遥控机器人(ROV-Remotely Operated Vehicle)和无人水下机器人(UUV-Unmanned Underwater Vehicle),这两类机器人都不是完全自主的,而是需要人的操纵. 这一点极大地限制了机器人的活动领域及其工作效率. 自主式水下机器人(AUV-Autonomous Underwater Vehicle, 本文简称水下机器人)是新一代水下机器人,由于其商业与军事上的重要意义和技术上面临的众多挑战,自主式水下机器人技术的研究受到越来越多科学家和技术人员的重视,并进行了大量的

研究工作^[1].

为保证自主式水下机器人在高压、可见度差的未知海洋环境下顺利完成作业任务,必然要求水下机器人具有容错控制能力. 容错控制系统主要包括三部分:故障检测、故障定位和故障处理(容错控制). 目前故障处理的方法有很多,如基于解析模型的方法、基于人工智能的方法. 本文,主要探讨水下机器人执行器出现故障时的容错控制技术,在实际工作中,从简单实用的角度出发,提出重新进行推力分配的容错控制策略. 这种容错控制策略,并不需要额外的增加执行器,而是利用推力器本身的功能冗余,实现容错控制.

2 水下机器人解耦控制器 (Decoupling controller of AUV)

解耦控制在过程控制中具有特别重要的意义,工业过程通常不希望某一设定值的改变引起其他被控变量随之发生大的波动.解耦后的系统无论从整定,还是可靠性角度考虑都比一般的多变量系统有利.水下机器人是一个强非线性系统,各个自由度的运动相互耦合,其耦合情况既难于定性描述,更难于定量地表达,我们设计控制器时,应该避开运动相互耦合这个难点.虽然水下机器人各自由度的运动相互耦合,但针对某个特定的水下机器人,其各个自由度的推力与推力器发出的力之间的关系一般都不复杂.为此,我们可以考虑进行各个自由度解耦,而每一个自由度上设计一个控制器(每个自由度的控制器是该自由度上偏差及偏差变化率的非线性函数),然后再进行推力分配.

2.1 控制器

目前研究的控制方法有很多,每种控制方法都有其优点与缺点.由于水下机器人的非线性很强,采用的控制方法主要是神经网络和模糊逻辑控制.这里我们采用一种简单实用的新型控制方法^[2]——S面控制.该控制方法结构简单、输入量少、适用于非线性系统,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,在水下机器人海上试验中取得了成功.

我们为水下机器人每个自由度设计一个S面控制器:

$$u_i = 2.0 / (1.0 + e^{(-k_{i1}e_i - k_{i2}\dot{e}_i)}) - 1.0 + \Delta u_i$$

$$i = 1, 2, \dots, 6 \quad (1)$$

$$f_i = K_i u_i$$

其中, e_i 和 \dot{e}_i 为第 i 自由度控制的输入信息(偏差和偏差变化率,通过归一化处理), u_i 为第 i 自由度控制输出, k_{i1} 和 k_{i2} 分别为对应第 i 自由度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, f_i 为该自由度上所需力的大小, K_i 为比例系数, $i=1, 2, \dots, 6$ 代表水下机器人六个自由度的运动:纵向、横向、垂向、摇艏、纵倾、横摇. Δu_i 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) 判断机器人第 i 自由度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) 将数组的值往前窜一位,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;

这样我们就设计了六个自由度的控制器,每一个自由度的控制器都可以根据当前的偏差及偏差变化率给出该自由度的控制输出.但这只是每个自由度需要的力的大小,我们是通过执行器来控制水下机器人的,就需要将当前的控制输出分配给每一个执行器.

2.2 推力分配

推力分配主要依靠执行器的配置,也就是每个执行器的能力和它的安装位置.我们以哈尔滨工程大学研制的“智水Ⅱ”型水下机器人为研究对象.该水下机器人的推力器系统是由六个推力器组成,推力器布置见图2.1.艇的艏部和艉部各安装了一个槽道侧向推力器和垂向推力器,艉部还有两个主推力器.按左主推力器、右主推力器、艏侧推力器、艉侧推力器、艏垂推力器、艉垂推力器分别记为推力器 HThr1~HThr4, VThr1, VHhr2.

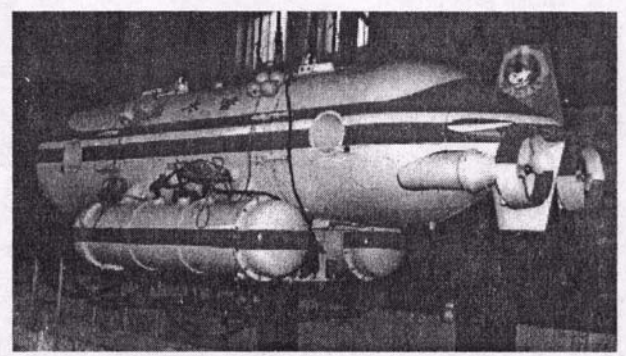


图1 “智水Ⅱ”型水下机器人

Fig.1 “ZHISHUI II” AUV

由于推力器在水下机器人上的安装基本上是左右对称的,推力器不能发出控制横摇的力矩,所以不控制横摇(由于机器人左右对称,且是细长型,一般也不需要控制横摇).四个水平推力器推力在坐标系中的位置如图2.根据推力器的安装位置,五个自由度的力与六个推力器发出的力之间有如下关系:

$$\begin{bmatrix} F_x \\ F_y \\ M_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 \\ l & -l & l_3 & -l_4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} HThr1 \\ HThr2 \\ HThr3 \\ HThr4 \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$\begin{bmatrix} F_x \\ M_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ -l_5 & l_6 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} VThr1 \\ VThr2 \end{bmatrix} \quad (3)$$

我们要控制的是六个推力器,所以对上面的公式进行反变换,从而得到每个推力器的控制指令.从上面的关系我们可以看出,水平面的控制是冗余的.

$$\begin{bmatrix} HThr1 \\ HThr2 \\ HThr3 \\ HThr4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 \\ l & -l & l_3 & -l_4 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} F_x \\ F_y \\ M_z \end{bmatrix} \quad (4)$$

我们采用伪逆的方法可以求解上式,但在实际中,为了简化计算,我们一般采用增加约束条件的方法进行推力分配.比如我们增加约束条件:

$$HThr1 = HThr2$$

这样我们就得到直接结果:

$$\begin{bmatrix} HThr1 \\ HThr3 \\ HThr4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 \\ 0 & l_3 & -l_4 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} F_x \\ F_y \\ M_z \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$= \begin{bmatrix} 1/2 & 0 & 0 \\ 0 & l_4/(l_3 + l_4) & 1/(l_3 + l_4) \\ 0 & l_3/(l_3 + l_4) & -1/(l_3 + l_4) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_x \\ F_y \\ M_z \end{bmatrix}$$

$$HThr2 = HThr1$$

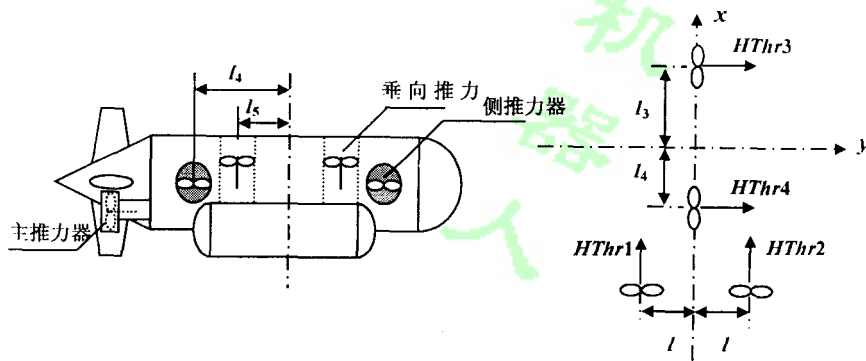


图 2 推力器布置图

Fig. 2 Thrusters configuration

3 容错控制方法 (Fault-tolerant control)

因为水平面具有功能冗余,当推力器出现故障时,我们可以采用容错控制方法,实现在故障情况下的自主控制.我们的容错控制是基于以下假设:

- (1) 只有一个推力器出现故障.
- (2) 一旦一个推力器出现故障,就认为该推力器完全不能工作.
- (3) 容错控制是在已经诊断出哪个推力器出现故障的基础上进行的.

容错控制的策略就是重新进行推力分配.当一个推力器出现故障时,只需要将正常的推力分配矩阵中该推力器对应的列去掉,此时,就不再是冗余控制,也就不需要增加约束条件了,可以直接得到各自由度控制器输出与每个推力器之间的关系,比如当艉侧推力器(推力器 4)坏了

$$\begin{bmatrix} HThr1 \\ HThr2 \\ HThr3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ l & -l & l_3 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} F_x \\ F_y \\ M_z \end{bmatrix} \quad (6)$$

4 仿真结果 (Simulation results)

我们在仿真中人为设定推力器 4 故障(不给艉侧推力器发控制指令).图中是机器人从起始点(5, 5, π/4)走向目标点(0, 0, 0)(三个坐标值分别是 x 坐标、y 坐标、艉向角 φ)的位置偏差.由于艉侧推力器故障对机器人运动影响不是很大,可以看出,在艉侧推力器出现故障不加容错控制策略时,机器人在原来控制器的控制下也走到了目标点附近,但在目标点附近 x 坐标与 y 坐标有一个固定的偏差,而艉向不仅在目标点附近有固定偏差,而且在整个过程中控制出现震荡,不能达到很好的控制效果和控制精度,这样就不能保证机器人完成精确的作业任务.而在容错控制下,控制效果几乎和没有故障时是一样

的,只是由于艏侧推力器故障使得水下机器人的转艏能力下降,机器人需要相对较长一些时间转到目标指定的艏向角。

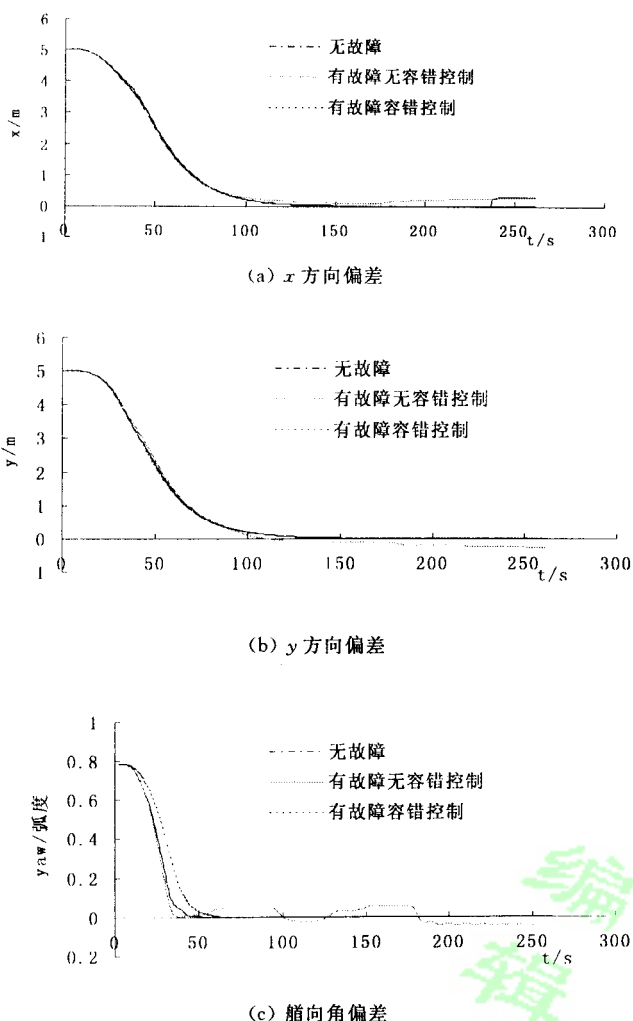


图3 仿真实验结果

Fig. 3 Simulation results

5 结论(Conclusion)

从仿真结果看,当出现故障时,不加容错控制时,控制过程可能会出现震荡,在目标点附近还会有一个固定偏差,而增加容错控制策略,容错控制的效果和无故障的效果几乎一样,控制精度达到作业要求.因此,当水下机器人执行器(推力器)具有功能冗余时,我们并不需要增加额外的执行器,可以采取一定的容错控制策略,保证机器人在出现故障时仍能顺利地完成任务。

参考文献 (References)

- [1] Yongjie Pang, You Shang, Yuru Xu. Software Design Technique for the Man-Machine Interface to Autonomous Underwater Vehicles. Proceedings of the 1998 International Symposium on Underwater Technology. Japan. 1998; 370-374
- [2] 刘学敏,徐玉如.水下机器人运动的S面控制方法.海洋工程,2001,19(3):81-84
- [3] 刘学敏,李英辉,徐玉如.基于运动平衡点的水下机器人自主避障方式.机器人,2001,23(3):270-274
- [4] A Alessanfri, M Caccia, G Veruggio. Fault detection of actuator faults in unmanned underwater vehicles. Control Engineering Practice. 1999,7: 357-368
- [5] Tarun Kanti Podder, Nilanjan Sarkar. Fault-tolerant control of an autonomous underwater vehicle under thruster redundancy. Robotics and Autonomous Systems 2001,34: 39-52
- [6] Albert S-F Cheng, Naomi Ehrich Leonard. Fin failure compensation for an unmanned underwater vehicle. Proc 11th Int on unmanned untethered submersible technology. August 1999; 1-10
- [7] M Caccia, G Veruggio. Guidance and control of a reconfigurable unmanned underwater vehicle. Control Engineering Practice. 2000,8: 21-37

作者简介:

刘建成(1977-),女,博士生,研究领域:水下机器人故障诊断与智能控制。

(上接第155页)

- [3] Foux G, Heymann M, Bruckstein A. Two-Dimensional Robot Navigation Among Unknown Stationary Polygonal Obstacles. IEEE Transactions on Robotics and Automation, 1993,9(1): 96-102
- [4] 孙增圻. 智能控制理论与技术. 北京:清华大学出版社,1997
- [5] 刘唯信,孟嗣宗. 机械最优化设计. 北京:清华大学出版社,1986
- [6] Kirkpatrick S. Optimization by Simulated Annealing. Science, 1983,(220): 671-680
- [7] Romeijn H E and Smith R L. Simulated Annealing for Constrained Global Optimization. Journal of Global Optimization,

1994,(5): 101-124

- [8] 杨若黎,顾基发.一种高效的模拟退火全局优化算法.系统工程理论与实践,1997,17(5):29-35

作者简介:

王仲民(1974-),男,硕士,讲师,研究领域:机器人技术及应用,人工智能等。

岳宏(1936-),男,教授,博士生导师,研究领域:智能控制,机器人学等。