

文章编号: 1001-0920(2013)11-1741-04

考虑剩余浮力影响的欠驱动水下机器人深度控制

李岳明, 万磊, 孙玉山, 张国成

(哈尔滨工程大学 a. 水下机器人技术重点实验室, b. 船舶工程学院, 哈尔滨 150001)

摘要: 为了实现水下机器人带有剩余浮力影响的欠驱动深度控制, 将垂直面控制划分为定速航行控制和深度控制. 采用成熟的S面速度控制器保证速度控制稳定, 着重解决深度控制问题. 引入虚拟控制量, 使剩余浮力影响下的深度偏差映射为目标纵倾角, 通过设计俯仰控制器实现对目标纵倾角的跟踪. 稳定性分析表明, 所研究的欠驱动深度控制是稳定的, 且对于参数估计的偏差不敏感. 仿真实验结果表明, 所提出的方法能够抵抗剩余浮力的影响, 深度控制准确, 并具有良好的鲁棒性.

关键词: 水下机器人; 欠驱动控制; 深度控制; S面控制

中图分类号: TP24

文献标志码: A

Depth control of underactuated autonomous underwater vehicle considering residual buoyancy influence

LI Yue-ming, WAN Lei, SUN Yu-shan, ZHANG Guo-cheng

(a. Science and Technology on Underwater Vehicle Laboratory, b. College of Shipbuilding Engineering, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China. Correspondent: LI Yue-ming, E-mail: each-day@163.com)

Abstract: Aiming at the vertical plane motion control of autonomous underwater vehicle(AUV) with the influence of residual buoyancy, the vertical motion plane control is divided into forward speed control and depth control. Adopting the mature S plane controller to ensure the stability of speed control, the problem of depth control is selectively solved. By introducing the virtual control, the depth deviation with the influence of residual buoyancy is mapped into the desired pitch angle, which is tracked through the design of pitching controller. The stability analysis shows that the proposed underactuated depth control is stable and robust for the variation of parameter estimation. Finally, the simulation results show that the proposed method is resistible for the influence of residual buoyancy, and the depth control is accurate and robust.

Key words: autonomous underwater vehicle; underactuated control; depth control; S plane control

0 引言

水下机器人运动具有非线性、多自由度耦合、精确模型难以获得等缺陷, 同时环境干扰强烈并具有不确定性, 水下机器人作业任务对运动控制器的控制精度、鲁棒性和可靠性提出了较高的要求. 同时, 一类水下机器人由于某些自由度缺少直接控制, 具有明显的欠驱动特性, 给运动控制器设计带来极大困难.

对于欠驱动深度控制, 可以利用逆向分步技术^[1], 通过构造Lyapunov函数和引入虚拟控制量, 确定控制律使之保证Lyapunov函数负定, 解决欠驱动深度控制问题, 但是该方法需要满足垂向运动稳定的假设条件. 文献[2]针对INFANTE水下机器人设计了控制

器, 实现了垂直面线性降阶反馈控制, 并通过海上实验验证了方法的有效性, 由于该方法需要针对每个目标航速进行分析综合, 增加了控制器设计难度. 文献[3]突破小倾角限制, 使用反步法设计了深度控制器, 通过引入3个虚拟控制量分3步构造Lyapunov函数, 使非线性深度控制器稳定, 最后进行了仿真实验. 文献[4]采用级联系统理论, 将3维直线跟踪误差模型分解为水平运动受垂直面运动扰动的级联结构, 分别设计了俯仰角和航向角指令及跟踪控制律, 实现了3维直线跟踪误差的全局指数稳定. 文献[5]提出了基于非线性迭代滑模增量反馈的航迹跟踪控制器, 实现了未知海流干扰作用下的地形跟踪控制. 以上文

收稿日期: 2012-07-27; 修回日期: 2012-11-21.

基金项目: 国家863计划项目(2008AA092301-2); 中央高校基本科研业务费专项基金项目(HEUCF1321005); 中国博士后科学基金项目(20100480964).

作者简介: 李岳明(1983—), 男, 博士生, 从事水下机器人运动控制的研究; 万磊(1954—), 男, 研究员, 博士生导师, 从事智能水下机器人控制系统开发等研究.

献在深度控制研究过程中均假设机器人满足浮力和重力平衡,然而文献[6]根据实验结果指出大型水下机器人在大潜深航行时,因为海水温度、盐度和材料压缩变形等因素影响,载体浮力会发生一定的变化,所以,在解决大潜深水下机器人深度控制问题时,不能忽略载体剩余浮力的影响.由于文献[1-5]深度控制的假设条件被破坏,控制效果将受到严重影响.

研究对象在航速大于1.0 m/s时,出于节约能源的考虑,会将此时效率较低的垂推关闭,因此升沉自由度具有欠驱动特性.另外,为了安全起见,机器人载体保留了一定的剩余浮力,同时进行大深度航行时载体自身的浮力也会发生变化,因此欠驱动特性和剩余浮力给深度控制带来一定的难度.鉴于此,本文采用S面速度控制器,并且认为速度控制是稳定的,重点解决深度控制问题.建立欠驱动升沉和俯仰运动方程,通过引入虚拟控制量,将考虑剩余浮力影响的深度偏差转化为目标纵倾角,设计纵倾控制器实现对目标纵倾角的跟踪控制,从而实现欠驱动深度控制.对深度控制的稳定性和鲁棒性进行了分析,并在仿真环境下对控制器的控制效果进行了对比实验研究.

1 AUV 垂直面运动模型

文献[7]建立的六自由度水下机器人运动方程为

$$M\dot{v} + C(v)v + D(v)v + g(\eta) = \tau. \quad (1)$$

其中: v 为六自由度速度向量, M 为系统惯性矩阵(包含附加质量), C 为科氏加速度矩阵, D 为阻尼矩阵, g 为重力浮力和力矩向量.

忽略高阶阻尼项,将式(1)进行泰勒展开,保留一阶项可得到垂直面运动模型为

$$\begin{bmatrix} m - X_{\dot{u}} & -X_{\dot{w}} & mz_g - X_{\dot{q}} \\ -X_{\dot{w}} & m - Z_{\dot{w}} & -mx_g - Z_{\dot{q}} \\ mz_g - X_{\dot{q}} & -mx_g - Z_{\dot{q}} & I_y - M_{\dot{q}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{u} \\ \dot{w} \\ \dot{q} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -X_u & -X_w & -X_q \\ -X_w & -Z_w & -Z_q \\ -X_q & -Z_q & -M_q \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u \\ w \\ q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -(m - X_{\dot{u}})u \\ 0 & Z_{\dot{w}} - X_{\dot{u}} & mx_g u \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u \\ w \\ q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ (W - B) \cos \theta \\ BG_z \sin \theta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \tau_X \\ \tau_Z \\ \tau_M \end{bmatrix}. \quad (2)$$

其中: $[u, w, q]^T$ 为运动状态变量,分别代表纵向速度、升沉速度和俯仰角速度; m 为机器人质量; $X_{(\cdot)}$, $Z_{(\cdot)}$, $M_{(\cdot)}$ 为水动力导数; $I_{(\cdot)}$ 为转动惯量; x_g, z_g 为重心坐标; G_z 为稳心高; $\tau_{(\cdot)}$ 为控制力(矩); $(W - B)$ 为剩余静载, $(B - W)$ 为剩余浮力; θ 为当前纵倾角.

由于缺少垂向执行器, $\tau_Z = 0$. 对于垂向欠驱动控制器问题,可设计两个用于速度和俯仰控制的解耦控制器进行解决.速度控制器采用S面^[8-10]控制方法设计,得到的速度控制器为

$$\tau_X = T_{\max} \int k \left[\frac{2}{1 + \exp\left(k_1 \frac{u - u_d}{u_{\max}} + k_2 \frac{\dot{u} - \dot{u}_d}{\dot{u}_{\max}}\right)} - 1 \right] dt. \quad (3)$$

其中: T_{\max} 为纵向最大推力; u_d 为期望速度; u_{\max} 为机器人最大前进速度; \dot{u}_{\max} 为机器人最大加速度; k , k_1, k_2 为控制参数.海上实验证明该速度控制器效果较好,因此可以假设机器人始终保持期望航速航行,即 $u = u_d$,进而可得到升沉和俯仰运动方程为

$$\begin{cases} (m - Z_{\dot{w}})\dot{w} - Z_w w + (W - B) \cos \theta = 0, \\ (I_y - M_{\dot{q}})\dot{q} - M_q q + BG_z \sin \theta = \tau_M. \end{cases} \quad (4)$$

2 俯仰控制器设计和深度控制稳定性分析

2.1 俯仰控制器设计

首先定义虚拟控制量 θ_d , 将深度偏差转化为目标纵倾角,即 $\theta_d = (d - d_d)/\bar{d}$. 其中: d 为当前深度, d_d 为期望深度; \bar{d} 为特征深度,该值与机器人俯仰运动能力相关.因此有 $d = \theta_d \bar{d} + d_d$, 根据运动学方程

$$\begin{cases} \dot{d} = w \cos \theta - u \sin \theta, \\ \dot{\theta} = q, \end{cases} \quad (5)$$

有

$$w = (\dot{d} + u \sin \theta) / \cos \theta. \quad (6)$$

考虑小纵倾运动 $\sin \theta \approx \theta$, $\cos \theta \approx 1$, 则有

$$\dot{w} = \ddot{d} + \dot{u}\theta + u\dot{\theta}. \quad (7)$$

将式(5)~(7)代入(4)得

$$\begin{cases} (m - Z_{\dot{w}})\ddot{d} - Z_w \ddot{\theta}_d + (m - Z_{\dot{w}})u\dot{\theta} - Z_w u\theta + (W - B) \cos \theta = 0, \\ (I_y - M_{\dot{q}})\dot{q} - M_q q + BG_z \sin \theta = \tau_M. \end{cases} \quad (8)$$

式(8)中两个方程分别为期望纵倾角和实际纵倾角的动力学方程,考虑到 $\dot{q} = \ddot{\theta}$ 和 $q = \dot{\theta}$, 定义纵倾角跟踪偏差 $e = \theta - \theta_d - \theta_0$, θ_0 为机器人以航速 u_d 定深航行时的零升力纵倾角. 由于

$$\ddot{\theta} = \frac{\tau_M + M_q q - BG_z \sin \theta}{I_y - M_{\dot{q}}}, \quad (9)$$

$$\ddot{\theta}_d = \frac{Z_w \ddot{d} - (m - Z_{\dot{w}})u\dot{\theta} + Z_w u\theta - (W - B) \cos \theta}{(m - Z_{\dot{w}})\bar{d}}, \quad (10)$$

e 的动态方程为

$$\ddot{e} = \ddot{\theta} - \ddot{\theta}_d = \frac{\tau_M + M_q q - BG_z \sin \theta}{I_y - M_{\dot{q}}} -$$

$$\frac{Z_w \bar{d} \ddot{\theta}_d - (m - Z_{\dot{w}}) u \dot{\theta} + Z_w u \theta - (W - B) \cos \theta}{(m - Z_{\dot{w}}) \bar{d}}, \quad (11)$$

整理得

$$\begin{aligned} & B_1 \ddot{e} + A_2 B_1 \dot{e} / A_1 - A_0 B_1 / A_1 - \\ & (B_1 u / \bar{d} + A_2 B_1 / A_1 - B_2) - \\ & (A_3 B_1 / A_1 - B_3) \theta = \tau_M. \end{aligned} \quad (12)$$

其中

$$A_1 = (m - Z_{\dot{w}}) \bar{d}, \quad A_2 = -Z_w \bar{d}, \quad A_3 = -Z_{\dot{w}} u,$$

$$A_0 = (W - B) \cos \theta, \quad B_1 = I_y - M_{\dot{q}},$$

$$B_2 = -M_q, \quad B_3 = B G_z \sin \theta.$$

令 $\tau_M = \tau_1 + \tau_2$, 其中

$$\begin{aligned} \tau_1 = & -[A_0 B_1 / A_1 + (B_1 u / \bar{d} + A_2 B_1 / A_1 - B_2) + \\ & (A_3 B_1 / A_1 - B_3) \theta], \end{aligned}$$

τ_2 为待设计的控制输入, 则有

$$B_1 \ddot{e} + A_2 B_1 \dot{e} / A_1 = \tau_2. \quad (13)$$

τ_1 中包含了剩余静载 $(W - B) \cos \theta$, 可以认为 τ_1 是克服剩余浮力影响的前馈项, 即使 $e = 0$ 时仍然有纵倾力矩输出. τ_2 为单纯的线性反馈控制, 可采用如下 PID 控制:

$$\tau_2 = k_p e + k_d \dot{e} + k_i \int e dt. \quad (14)$$

2.2 深度控制的稳定性分析

应用经典线性控制器设计方法, 选择合适的 k_p , k_d 和 k_i 可以保证纵倾角跟踪误差 e 在有限时间内收敛到 0, 即 $e = 0, \dot{e} = 0$. 由 $e = 0$ 可得, $e = \theta - \theta_d - \theta_0 = 0$, 则有 $\theta - \theta_0 = \theta_d$. 为了考察 θ_d 的稳定性, 选择如下李亚普诺夫函数:

$$V = \frac{1}{2} \theta_d^2, \quad (15)$$

则有 $\dot{V} = \theta_d \dot{\theta}_d$. 当 $\theta_d > 0$ 时, 有 $\theta > \theta_0$, 此时受水动力影响机器人开始上浮, 即 $\dot{\theta}_d < 0$; 当 $\theta_d < 0$ 时, 有 $\theta < \theta_0$, 此时受水动力影响机器人开始下潜, 即 $\dot{\theta}_d > 0$. 从而有 $\dot{V} \leq 0$, 因此 θ_d 是渐近稳定的, 即深度 d 的控制是稳定的.

下面证明 θ_d 的稳定性与 θ_0 的估计偏差无关. 由于模型误差和未建模部分水动力的影响, θ_0 的估计总是带有一定偏差. 设控制器采用的 θ_0 估计值为 $\bar{\theta}_0$, 估计偏差 $\Delta\theta = \theta_0 - \bar{\theta}_0$, 当 $e = 0$ 时, 有 $\theta - \bar{\theta}_0 = \theta_d$. 当 $\theta_d > 0$ 时, 有 $\theta + \Delta\theta > \theta_0$, 此时受水动力影响机器人开始上浮, 即 $\dot{\theta}_d < 0$; 当 $\theta_d < 0$ 时, 有 $\theta + \Delta\theta < \theta_0$, 此时受水动力影响机器人开始下潜, 即 $\dot{\theta}_d > 0$. 因此, $\dot{V} \leq 0$ 不受 $\Delta\theta$ 的影响, 即 θ_d 的稳定性与 $\bar{\theta}_0$ 的选择无关.

3 仿真实验

为了验证本文提出方法的有效性, 在 XX 自主水下机器人仿真实验平台进行仿真实验^[11], 系统主要参

数如表 1 所示, X' 为无量纲化参数.

表 1 主要模型参数

参数	数值	单位	参数	数值	单位
I_y	7580.0	kg·m ²	$M_{\dot{q}}'$	-0.002 05	-
$Z_{\dot{w}}'$	-0.076 34	-	M_q'	-0.021 98	-
\bar{d}	5.0	m	G_z	0.094	m
Z_w'	-0.027 18	-	$W - B$	待定	N

为了验证本文提出方法的深度控制效果, 进行一组实验, 初始状态如下: 速度为 0 m/s, 深度为 0 m, 目标深度为 3 m, 剩余浮力为 200 N, 目标航速分别为 1.6 m/s, 1.9 m/s, 2.2 m/s, 2.5 m/s, 实验结果如图 1 和图 2 所示.

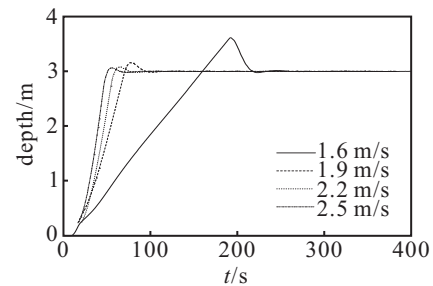


图 1 不同航速下深度控制结果

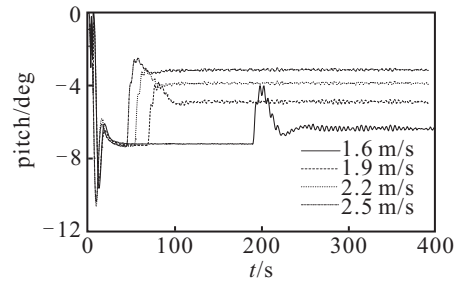


图 2 不同航速下纵倾变化曲线

由实验结果可以看出:

1) 新方法在多个航速下深度控制效果良好, 超调较小, 稳定较快(除低航速外), 证明不需要针对每个特定航速都单独设计控制器.

2) 随着航速的增高, 稳定纵倾角逐渐减小, 验证了相同纵倾角艇体水动力随航速提高而增加的规律, 同时航速较高时下潜速度较快.

3) 剩余浮力影响下, 航速越低, 下潜越困难, 因此存在一个航速门限, 以保证在剩余浮力不确定时深度的有效控制, 从实验结果上看本文研究对象航速门限必须大于 1.6 m/s.

为了对比不同方法的控制效果, 进行仿真对比实验. 对比控制方法采用逆向分步控制方法, 控制器表达式如下:

$$\begin{aligned} \tau_M = & - \left[M_{qq} - B G_z W \sin \theta - \right. \\ & \left. \frac{I_y - M_{\dot{q}}}{\lambda} (\dot{\alpha}_1 - z_1 - k_4 z_2) \right]. \end{aligned} \quad (16)$$

其中: λ, k_3, k_4 均为大于 0 的控制参数; $z_1 = (d - d_d) + \lambda\theta$; $\alpha_1 = u \sin \theta - w \cos \theta - k_3 z_1$; $z_2 = \alpha_1 - \lambda q$.

控制算法中剩余浮力估计值为 80 N, 仿真实验中依次加载剩余浮力为 200 N, 控制器与仿真剩余浮力的不匹配设置目的在于验证控制器的鲁棒性, 这与实际应用中载体浮力不确定性相符. 设定目标航速为 2.0 m/s, 目标深度为 3 m, 初始状态速度为 0 m/s, 深度为 0 m, 在相同条件下, 新方法对比控制方法实验结果如图 3 和图 4 所示.

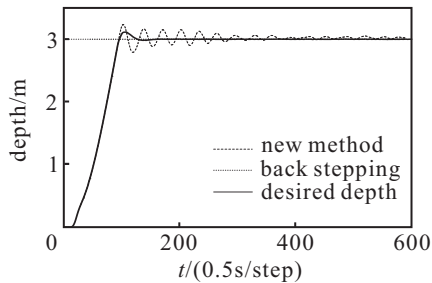


图 3 深度控制结果

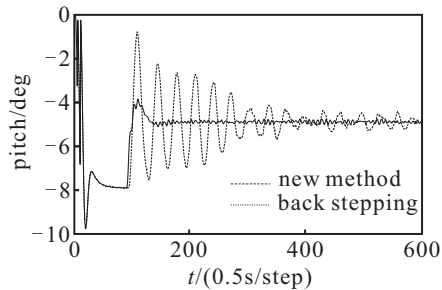


图 4 纵倾变化曲线

由实验结果可以看出:

1) 新方法深度控制稳定, 超调较小, 相比之下, 由于剩余浮力破坏了逆向分步法的垂向运动稳定假设条件, 导致深度控制发生震荡, 收敛较慢.

2) 在开始阶段, 机器人处于加速阶段, 系统状态变化较快, 控制器输出随之变化, 导致纵倾变化较剧烈. 到达目标深度后, 新控制器作用下控制纵倾角稳定在一定数值上, 依靠艇体水动力抵抗剩余浮力的影响. 逆向分步法控制器没有考虑剩余浮力, 因此深度和纵倾相互影响, 引起欠阻尼震荡运动.

3) 在较大的剩余浮力作用下, 新方法深度控制效果良好, 表明该方法对剩余浮力的失配具有较强的鲁棒性, 而逆向分步法控制难以稳定, 控制精度较低.

4 结 论

本文研究了考虑剩余浮力影响的水下机器人欠驱动深度控制问题. 对水下机器人垂直面运动采用解耦的控制方式, 通过 S 面速度控制器对速度进行控制, 并认为速度控制是稳定的, 便于解决深度控制问题. 通过虚拟控制量, 将深度偏差转化为期望纵倾角, 通过设计俯仰控制律实现机器人对目标纵倾角的跟踪.

俯仰控制律中包含两个部分, 一部分为考虑剩余浮力影响的前馈俯仰力矩输出, 另一部分为保证纵倾角跟踪偏差稳定收敛到 0 的线性反馈俯仰力矩输出. 通过对目标纵倾角的稳定性分析, 证明深度控制是稳定的, 并且对零升力纵倾角的估计偏差不敏感, 表明了深度控制可以有效应对剩余浮力的变化. 仿真实验表明, 所提出方法是有效的. 与已有方法进行比较, 证明了新方法的优越性, 并且对剩余浮力的不确定具有一定的鲁棒性. 下一步可将该方法应用于实际实验中, 便于进一步验证新方法的有效性.

参考文献(References)

- [1] Thor I F, Morten B, Roger S. Line-of-sight path following of underactuated marine craft[C]. The 6th IFAC MCMC. Girona: Elsevier, 2003: 244-249.
- [2] Silvestre C, Pascoal A. Depth control of the INFANTE AUV using gain-scheduled reduced order output feedback[J]. Control Engineering Practice, 2007, 15(7): 883-895.
- [3] Li J H, Lee P M. Design of an adaptive nonlinear controller for depth control of an autonomous underwater vehicle[J]. Ocean Engineering, 2005, 32(17-18): 2165-2181.
- [4] 高剑, 徐德民, 严卫生. 基于级联方法的欠驱动 AUV 全局 K 指数 3 维直线跟踪控制[J]. 控制与决策, 2012, 27(9): 1281-1287.
(Gao J, Xu D M, Yan W S. Global K-exponential straight-line tracking control of an underactuated AUV in 3 dimensions using a cascaded approach[J]. Control and Decision, 2012, 27(9): 1281-1287.)
- [5] 边信黔, 程相勤, 贾鹤鸣, 等. 基于迭代滑模增量反馈的欠驱动 AUV 地形跟踪控制[J]. 控制与决策, 2011, 26(2): 289-292.
(Bian X Q, Cheng X Q, Jia H M, et al. A bottom-following controller for underactuated AUV based on iterative sliding and increment feedback[J]. Control and Decision, 2011, 26(2): 289-292.)
- [6] Stephen M. Autosub6000: A deep diving long range AUV[J]. J of Bionic Engineering, 2009, 6(1): 55-62.
- [7] Thor I F. Marine control systems: Guidance, navigation and control of ships rigs and underwater vehicles[M]. Oslo: Marine Cybernetics AS, 2002: 48-54.
- [8] 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 X M, Xu Y R. S control of automatic underwater vehicles[J]. Ocean Engineering, 2001, 19(3): 81-84.)
- [9] 甘永, 王丽荣, 刘建成, 等. 水下机器人嵌入式基础运动控制系统[J]. 机器人, 2004, 26(3): 246-249.
(Gan Y, Wang L R, Liu J C, et al. The embedded basic motion control system of autonomous underwater vehicle[J]. Robot, 2004, 26(3): 246-249.)

(下转第 1750 页)