



(12) 发明专利申请

(10) 申请公布号 CN 106681352 A

(43) 申请公布日 2017. 05. 17

(21) 申请号 201510750233. 8

(22) 申请日 2015. 11. 06

(71) 申请人 中国科学院沈阳自动化研究所
地址 110016 辽宁省沈阳市南塔街 114 号

(72) 发明人 徐春晖 王轶群 邵刚 赵宏宇
刘健

(74) 专利代理机构 沈阳科苑专利商标代理有限公司 21002
代理人 徐丽 周秀梅

(51) Int. Cl.
G05D 1/10(2006. 01)

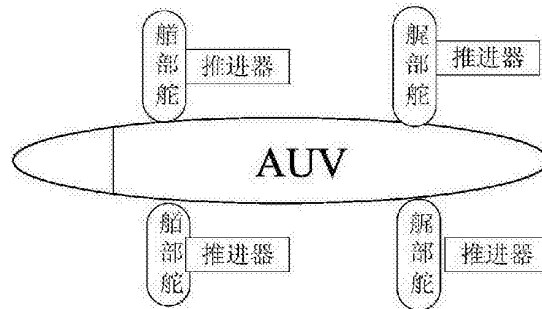
权利要求书2页 说明书4页 附图1页

(54) 发明名称

一种可旋转舵推进器的水下机器人控制方法

(57) 摘要

本发明涉及一种可旋转舵推进器的水下机器人控制方法,实现对 AUV 的五自由度运动控制。本发明包括速度控制、航向控制和垂直面控制;所述速度控制包括速度开环控制和速度闭环控制,所述速度开环控制不考虑速度反馈直接输出控制推进器轴向推力;所述速度闭环控制将速度反馈引入到航速控制器中;所述航向控制为变结构航向控制;所述垂直面控制分为强机动控制和弱机动控制,在水下机器人与目标位置的距离大于设定值时,采用强机动控制;否则采用弱机动控制。与传统的控制方法比较,本方法具有更好的鲁棒性,更能适应外界环境的改变,提高了 AUV 的控制能力。本方法移植方便,可以适用于各种机器人。



1. 一种可旋转舵推进器的水下机器人控制方法,其特征在于,包括速度控制、航向控制和垂直面控制;

所述速度控制包括速度开环控制和速度闭环控制,所述速度开环控制不考虑速度反馈直接输出控制推进器轴向推力;所述速度闭环控制将速度反馈引入到航速控制器中;

所述航向控制为变结构航向控制;

所述垂直面控制分为强机动控制和弱机动控制,在水下机器人与目标位置的距离大于设定值时,采用强机动控制;否则采用弱机动控制。

2. 根据权利要求1所述的一种可旋转舵推进器的水下机器人控制方法,其特征在于,所述速度开环控制的控制方法如下:

$$T_x = -X_{|u|u} |u_d| u_d$$

其中, T_x 是推进器的前向推力,是控制输出量; u_d 是 AUV 的目标速度,是控制输入量; $X_{|u|u}$ 是 AUV 与前向速度相关的水动力系数,是已知参数。

3. 根据权利要求1所述的一种可旋转舵推进器的水下机器人控制方法,其特征在于,所述速度闭环控制的控制方法如下:

$$T_x = -X_{|u|u} |u| u - (m - X_{\dot{u}}) [K_p (u - u_d) + K_i \int_0^t (u - u_d)]$$

其中, T_x 是推进器的前向推力,是控制输出量; u_d 是 AUV 的目标速度, u 是 AUV 的反馈速度, u_d 和 u 都是控制输入量; $X_{|u|u}$ 是 AUV 与前向速度相关的水动力系数, $m - X_{\dot{u}}$ 是 AUV 的惯性质量, $X_{|u|u}$ 和 $m - X_{\dot{u}}$ 都是已知参数, K_p 和 K_i 是需要整定的控制参数,通过线性控制理论的控制参数整定方法来计算。

4. 根据权利要求1所述的一种可旋转舵推进器的水下机器人控制方法,其特征在于,所述变结构航向控制的控制方法如下:

$$\tau_N = K_{p2} (\psi - \psi_d) + K_{d2} (r - r_d) + \eta \tanh(\sigma / 0.2)$$

其中, τ_N 是 AUV 的水平面转舵力矩,是航向控制的控制输出变量; σ 是滑膜面,是航向控制的中间变量; $(\psi - \psi_d)$ 是当前航向角误差, $(r - r_d)$ 是当前航向角误差的微分,它们是控制输入量; K_{p2} 是航向角误差系数, K_{d2} 是航向角误差微分系数, η 是滑膜系数,它们可以通过试验测定,是已知参数。

5. 根据权利要求1所述的一种可旋转舵推进器的水下机器人控制方法,其特征在于,所述弱机动控制的控制方法如下:

$$\tau_M = K_{d\theta} (d - d_d) + K_{p\theta} (\theta - \theta_d) + K_{d\theta} q + BG_z W \sin \theta$$

其中, τ_M 是垂直面的纵倾力矩,是控制输出量; d 是 AUV 的当前深度值, d_d 是 AUV 的当前目标深度值, θ 是 AUV 的纵倾角, θ_d 是 AUV 当前的目标纵倾角,它们是 AUV 的状态量,通过 AUV 的深度传感器和姿态传感器可以测量和计算; $(d - d_d)$ 是 AUV 的深度误差, $(\theta - \theta_d)$ 是 AUV 的纵倾角误差, q 是 AUV 的垂直角速率,它们是控制输入量; $K_{d\theta}$ 是 AUV 的深度误差系数, $K_{p\theta}$ 是 AUV 的纵倾角误差系数, $K_{d\theta}$ 是 AUV 的垂直角速率系数, $BG_z W \sin \theta$ 是 AUV 的重力/浮力垂直静力矩,它们可以通过试验测定,是已知参数。

6. 根据权利要求1所述的一种可旋转舵推进器的水下机器人控制方法,其特征在于,所述强机动控制的控制方法如下:

$$\tau_M = K_{p\theta 2} (\theta - \theta_d) + K_{d\theta 2} q + BG_z W \sin \theta$$

其中, τ_M 是垂直面的纵倾力矩, 是控制输出量; θ 是 AUV 的当前纵倾角, θ_d 是 AUV 当前的目标纵倾角, 它们是 AUV 的状态量, 通过 AUV 的姿态传感器可以测量和计算; $(\theta - \theta_d)$ 是 AUV 的纵倾角误差, q 是 AUV 的垂直角速率, 它们是控制输入量; $K_{p_{\theta_2}}$ 是 AUV 的纵倾角误差系数, $K_{d_{\theta_2}}$ 是 AUV 的垂直角速率系数, $BG_z W \sin \theta$ 是 AUV 的重力 / 浮力垂直静力矩, 它们可以通过试验测定, 是已知参数。

一种可旋转舵推进器的水下机器人控制方法

技术领域

[0001] 本发明涉及水下机器人技术领域,尤其涉及一种可旋转舵推进器的水下机器人(简称 AUV)控制方法,实现对 AUV 的五自由度(不包含横滚控制)运动控制。

背景技术

[0002] 在海洋应用中,水下机器人发挥越来越重要的作用。水下机器人分成两类:一种是遥控式有缆水下机器人(简称 ROV),一种是无人自治水下机器人(简称 AUV)。ROV 需要水面母船支持,同时受到电缆长度的限制,其作业距离有限,一般只有几百米;而 AUV 自身携带能源,可以远离母船,活动距离达到几十公里甚至上百公里。所以 AUV 的研究越来越受到各国的重视,AUV 的发展代表了未来水下机器人的发展方向。但是 AUV 的控制方法比 ROV 的控制方法复杂,只有设计出好的控制方法才能发挥出 AUV 强大的作业能力。传统 AUV 控制方法主要采用经典线性控制理论进行控制和对执行结构进行控制力分配,这种方法最大的好处是算法简单,但是 AUV 的水动力性能是非线性和时变的,水动力试验也很难获得精确的水动力系数,再加上 AUV 负载变化引起重心和浮心的改变,导致当 AUV 的外界条件发生改变时,经典线性控制理论的控制方法控制性能急剧下降。本发明采用经典控制理论与变结构控制相结合的方法,对于水动力参数变化的不敏感性和控制抗干扰性优于传统的控制方法,更加适合 AUV 这种非线性时变模型系统。

发明内容

[0003] 为了克服传统线性控制方法在对于水动力系数敏感性较强和抗干扰性较弱的问题,本发明要解决的技术问题提供一种可旋转舵推进器的水下机器人控制方法,降低控制系统对水动力参数敏感性和提高系统的控制抗干扰性。

[0004] 本发明为实现上述目的所采用的技术方案是:一种可旋转舵推进器的水下机器人控制方法,包括速度控制、航向控制和垂直面控制;

[0005] 所述速度控制包括速度开环控制和速度闭环控制,所述速度开环控制不考虑速度反馈直接输出控制推进器轴向推力;所述速度闭环控制将速度反馈引入到航速控制器中;

[0006] 所述航向控制为变结构航向控制;

[0007] 所述垂直面控制分为强机动控制和弱机动控制,在水下机器人与目标位置的距离大于设定值时,采用强机动控制;否则采用弱机动控制。

[0008] 所述速度开环控制的控制方法如下:

$$[0009] \quad T_x = -X_{|u|u} |u_d| u_d$$

[0010] 其中, T_x 是推进器的前向推力,是控制输出量; u_d 是 AUV 的目标速度,是控制输入量; $X_{|u|u}$ 是 AUV 与前向速度相关的水动力系数,是已知参数。

[0011] 所述速度闭环控制的控制方法如下:

$$[0012] \quad T_x = -X_{|u|u} |u| u - (m - X_u) [K_p (u - u_d) + K_i \int_0^t (u - u_d)]$$

[0013] 其中, T_x 是推进器的前向推力, 是控制输出量; u_d 是 AUV 的目标速度, u 是 AUV 的反馈速度, u_d 和 u 都是控制输入量; $X_{|u|u}$ 是 AUV 与前向速度相关的水动力系数, $m - X_{\dot{u}}$ 是 AUV 的惯性质量, $X_{|u|u}$ 和 $m - X_{\dot{u}}$ 都是已知参数, K_p 和 K_i 是需要整定的控制参数, 通过线性控制理论的控制方法来计算。

[0014] 所述变结构航向控制的控制方法如下:

$$[0015] \quad \tau_N = K_{p_2}(\psi - \psi_d) + K_{d_2}(r - r_d) + \eta \tanh(\sigma / 0.2)$$

[0016] 其中, τ_N 是 AUV 的水平面转舵力矩, 是航向控制的控制输出变量; σ 是滑膜面, 是航向控制的中间变量; $(\psi - \psi_d)$ 是当前航向角误差, $(r - r_d)$ 是当前航向角误差的微分, 它们是控制输入量; K_{p_2} 是航向角误差系数, K_{d_2} 是航向角误差微分系数, η 是滑膜系数, 它们可以通过试验测定, 是已知参数。

[0017] 所述弱机动控制的控制方法如下:

$$[0018] \quad \tau_M = K_{d_p}(d - d_d) + K_{p_\theta}(\theta - \theta_d) + K_{d_\theta}q + BG_z W \sin \theta$$

[0019] 其中, τ_M 是垂直面的纵倾力矩, 是控制输出量; d 是 AUV 的当前深度值, d_d 是 AUV 的当前目标深度值, θ 是 AUV 的纵倾角, θ_d 是 AUV 当前的目标纵倾角, 它们是 AUV 的状态量, 通过 AUV 的深度传感器和姿态传感器可以测量和计算; $(d - d_d)$ 是 AUV 的深度误差, $(\theta - \theta_d)$ 是 AUV 的纵倾角误差, q 是 AUV 的垂直角速率, 它们是控制输入量; K_{d_p} 是 AUV 的深度误差系数, K_{p_θ} 是 AUV 的纵倾角误差系数, K_{d_θ} 是 AUV 的垂直角速率系数, $BG_z W \sin \theta$ 是 AUV 的重力 / 浮力垂直静力矩, 它们可以通过试验测定, 是已知参数。

[0020] 所述强机动控制的控制方法如下:

$$[0021] \quad \tau_M = K_{p_{\theta_2}}(\theta - \theta_d) + K_{d_{\theta_2}}q + BG_z W \sin \theta$$

[0022] 其中, τ_M 是垂直面的纵倾力矩, 是控制输出量; θ 是 AUV 的当前纵倾角, θ_d 是 AUV 当前的目标纵倾角, 它们是 AUV 的状态量, 通过 AUV 的姿态传感器可以测量和计算; $(\theta - \theta_d)$ 是 AUV 的纵倾角误差, q 是 AUV 的垂直角速率, 它们是控制输入量; $K_{p_{\theta_2}}$ 是 AUV 的纵倾角误差系数, $K_{d_{\theta_2}}$ 是 AUV 的垂直角速率系数, $BG_z W \sin \theta$ 是 AUV 的重力 / 浮力垂直静力矩, 它们可以通过试验测定, 是已知参数。

[0023] 本发明具有以下有益效果及优点

[0024] 1. 对于水动力系数不敏感。相比传统的控制方法, 本方法对于水动力系数不敏感, 能够在水动力模型不准确的情况下使用。

[0025] 2. 能够更好地适应外界环境的改变。当外界环境发生改变时, 例如 AUV 负载的变化和外界海流的变化, 传统的控制方法会偏离最佳工作状态, 降低控制系统性能; 本方法具有更好的鲁棒性, 能够更好地适应外界环境的改变。

[0026] 3. 应用范围广。本发明不但可以应用于 AUV, 还可以用于各种机器人的运动控制。

附图说明

[0027] 图 1 是本发明的组成示意图。

具体实施方式

[0028] 下面结合附图及实施例对本发明做进一步的详细说明。

[0029] 本发明的硬件要求是一台 AUV, AUV 的艏部配置 2 个水平舵, 在艏部水平舵上装有

2 个推进电机；艏部配置 2 个水平舵，在艏部水平舵上装有 2 个推进电机；在艏部配置一个垂直舵，如图 1 所示。

[0030] 本发明的 AUV 运动控制方法包括以下几个内容：

[0031] 速度控制的作用是保持 AUV 以指定的前向速度航行。速度控制包括两种，一种是速度开环控制，是不考虑速度反馈直接输出控制推进器轴向推力的控制；另一种是速度闭环控制，是将速度反馈引入到航速控制器设计中。速度控制线性性比较高，所以采用经典线性控制方法。

[0032] 速度开环控制的控制方法如下：

$$[0033] \quad T_x = -X_{|u|u} |u_d| u_d$$

[0034] 其中， T_x 是推进器的前向推力，是控制输出量； u_d 是 AUV 的目标速度，是控制输入量； $X_{|u|u}$ 是 AUV 与前向速度相关的水动力系数，是已知参数。

[0035] 速度闭环控制的控制方法如下：

$$[0036] \quad T_x = -X_{|u|u} |u| [u - (m - X_{\ddot{u}}) [K_p (u - u_d) + K_i \int_0^t (u - u_d) dt]]$$

[0037] 其中， T_x 是推进器的前向推力，是控制输出量； u_d 是 AUV 的目标速度， u 是 AUV 的反馈速度， u_d 和 u 都是控制输入量； $X_{|u|u}$ 是 AUV 与前向速度相关的水动力系数， $m - X_{\ddot{u}}$ 是 AUV 的惯性质量， $X_{|u|u}$ 和 $m - X_{\ddot{u}}$ 都是已知参数。 K_p 和 K_i 是需要整定的控制参数，可以通过线性控制理论的参数整定方法来计算。

[0038] 航向控制的作用是保持 AUV 在指定的航向上沿直线稳定航行。在要求 AUV 进行水平面机动时，航向控制能够及时改变 AUV 的航向，转到指定的目标航向航行。传统航向控制的线性控制方法对于水动力参数敏感，当外界环境发生改变时，线性控制方法的航向控制就偏离最佳工作状态，增加操舵次数和推进器转速变更次数，造成舵机和推进器磨损，降低执行机构的使用寿命。当线性控制方法的航向控制偏离最佳工作状态时，还会造成周期性的航向震荡，降低 AUV 的航行品质。所以本发明设计了变结构航向控制。变结构航向控制设计如下：

[0039] 首先，设计航向控制的滑膜面，它的作用抑制外界改变对航向控制器的影响，提高航向控制器的鲁棒性：

$$[0040] \quad \sigma = K_{i1} (\psi_i - \psi_{id}) + K_{p1} (\psi - \psi_d) + K_{d1} (r - r_d)$$

[0041] 其中 σ 是滑膜面，是航向控制的中间变量； ψ_i 是当前航向角误差的积分， ψ_{id} 是当前目标航向角的积分， ψ 是当前航向角， ψ_d 是当前目标航向角， r 是当前航向角的微分， r_d 是目标航向角微分，它们是 AUV 的状态量，通过 AUV 的姿态传感器可以测量和计算； $(\psi_i - \psi_{id})$ 是航向角误差的积分， $(\psi - \psi_d)$ 是当前航向角误差， $(r - r_d)$ 是当前航向角误差的微分，它们是控制输入量； K_{i1} 是航向角误差积分系数， K_{p1} 是航向角误差系数， K_{d1} 是航向角误差微分系数，它们可以通过水池试验测定，是已知参数。

[0042] 下一步，根据滑膜面设计的变结构航向控制：

$$[0043] \quad \tau_N = K_{p2} (\psi - \psi_d) + K_{d2} (r - r_d) + \eta \tanh(\sigma / 0.2)$$

[0044] 其中 τ_N 是 AUV 的水平面转艏力矩，是航向控制的控制输出变量； σ 是滑膜面，是航向控制的中间变量； $(\psi - \psi_d)$ 是当前航向角误差， $(r - r_d)$ 是当前航向角误差的微分，它们是控制输入量； K_{p2} 是航向角误差系数， K_{d2} 是航向角误差微分系数， η 是滑膜系数，它们可

以通过试验测定,是已知参数。

[0045] 垂直面控制的作用是保持 AUV 在指定的深度下稳定航行和在垂直面内进行深度机动操纵。表面上看,垂直面控制和水平面控制相同,实际上垂直面控制复杂度高于水平面控制,AUV 在垂直面运动,不但像水平面运动受到流体动力的作用外,还受到静力和静力矩的作用。垂直面控制分成强机动控制和弱机动控制,其中强机动控制是指大范围的垂直面机动,弱机动控制的垂直面机动范围比较小。

[0046] 弱机动控制设计如下:

$$[0047] \quad \tau_M = K_{d\theta} (d-d_d) + K_{p\theta} (\theta - \theta_d) + K_{d\theta} q + BG_z W \sin \theta$$

[0048] 其中, τ_M 是垂直面的纵倾力矩,是控制输出量; d 是 AUV 的当前深度值, d_d 是 AUV 的当前目标深度值, θ 是 AUV 的纵倾角, θ_d 是 AUV 当前的目标纵倾角,它们是 AUV 的状态量,通过 AUV 的深度传感器和姿态传感器可以测量和计算; $(d-d_d)$ 是 AUV 的深度误差, $(\theta - \theta_d)$ 是 AUV 的纵倾角误差, q 是 AUV 的垂直角速率,它们是控制输入量; $K_{d\theta}$ 是 AUV 的深度误差系数, $K_{p\theta}$ 是 AUV 的纵倾角误差系数, $K_{d\theta}$ 是 AUV 的垂直角速率系数, $BG_z W \sin \theta$ 是 AUV 的重力/浮力垂直静力矩,它们可以通过试验测定,是已知参数。

[0049] 强机动控制设计如下:

$$[0050] \quad \tau_M = K_{p\theta_2} (\theta - \theta_d) + K_{d\theta_2} q + BG_z W \sin \theta$$

[0051] 其中, τ_M 是垂直面的纵倾力矩,是控制输出量; θ 是 AUV 的当前纵倾角, θ_d 是 AUV 当前的目标纵倾角,它们是 AUV 的状态量,通过 AUV 的姿态传感器可以测量和计算; $(\theta - \theta_d)$ 是 AUV 的纵倾角误差, q 是 AUV 的垂直角速率,它们是控制输入量; $K_{p\theta_2}$ 是 AUV 的纵倾角误差系数, $K_{d\theta_2}$ 是 AUV 的垂直角速率系数, $BG_z W \sin \theta$ 是 AUV 的重力/浮力垂直静力矩,它们可以通过试验测定,是已知参数。

[0052] 在 AUV 设计完成后,首先进行水池水动力试验,获得 AUV 的水动力系数。然后按照本发明方法设计 AUV 的速度、水平面和垂直面控制器。最后,将使用本发明方法的 AUV 进行航行试验,验证控制方法的正确性。

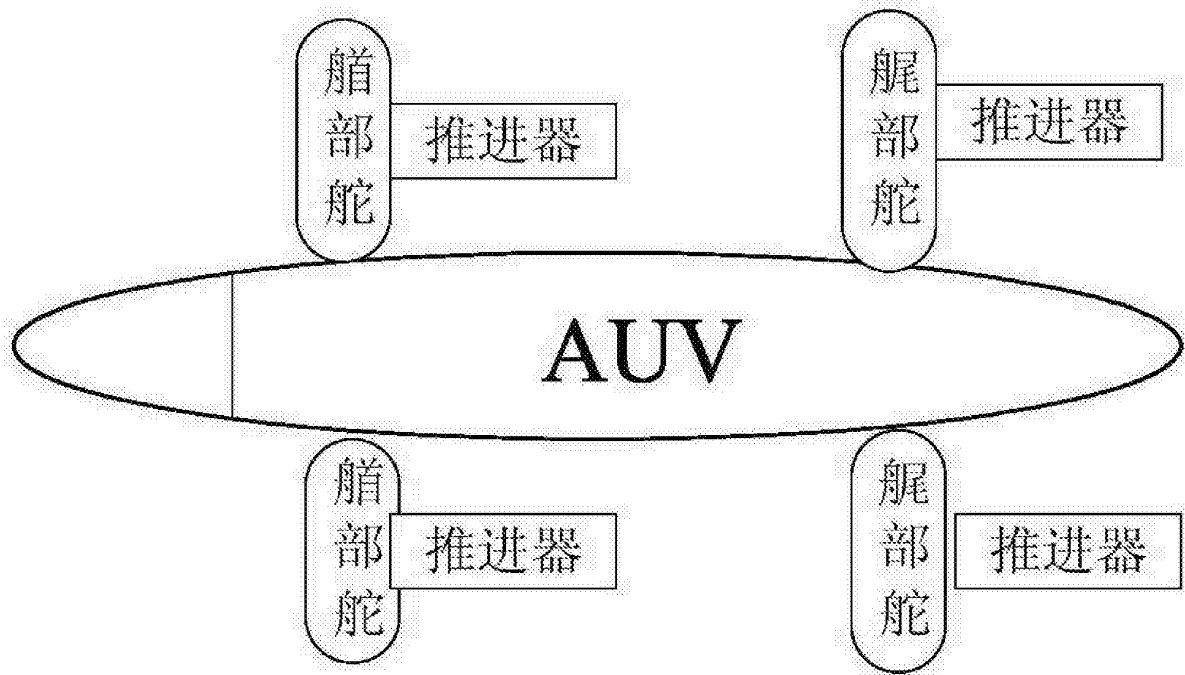


图 1