

多 AUV 主从式编队及避障控制方法^①丁国华^② 朱大奇^③

(上海海事大学水下机器人与智能系统实验室 上海 201306)

摘 要 研究了自治水下机器人(AUV)主从式编队控制问题,提出了一种基于反步控制和人工势场的多 AUV 三维编队与避障方法,并实现了 7AUV 编队控制仿真和 7AUV 避障控制仿真。该方法利用领航者的位置信息,引入反步控制实现跟随 AUV 对虚拟 AUV 的轨迹跟踪,实现三维水下编队控制;结合人工势场的方法变换队形,有效地避开障碍物,顺利地通过障碍物区域。仿真研究表明,该方法编队时间短,差错率低,实现了预期的控制效果,验证了算法的有效性及其实用性。

关键词 自治水下机器人(AUV),主从式,编队控制,反步控制,人工势场,避障

0 引言

近年来,多自治水下机器人(autonomous underwater vehicle, AUV)协作控制已经成为自治水下机器人领域的研究热点^[1,2]。编队控制(formation control)是 AUV 协作控制的基本问题,多 AUV 编队控制的方法大致有领航者-跟随者方法、基于行为的方法、虚拟结构方法等三种方法^[3]。基于行为的方法的基本思想是将队形控制分解为一系列基本行为,通过行为的综合实现运动控制^[4]。该方法有明确的队形反馈,并实现分布式控制,但是对群体的行为没有明确定义,难以进行数学分析,不能保证队形的稳定性。虚拟结构方法^[5]将 AUV 编队从整体上看作是一个刚体的虚拟结构,每个 AUV 是刚体上相对位置固定的一点。该方法可通过定义刚体的行为来控制 AUV 整体的运动,但是不能根据环境的变化改变队形,因而限制了其应用范围,而且目前仅适用于二维的环境中。领航者-跟随者方法^[6]又叫主从式方法,该方法将 AUV 整体拆分为两两一组,一个领航 AUV,一个跟随 AUV,通过跟随者对领航者保持一定的角度和距离来实现队形控制,根据领航者与跟随者之间的相对位置关系,可以形成不同的网络拓扑结构,即不同的队形,当环境变化或者遇到障碍物时,可以及时地改变队形以通过障碍物区域。

主从式的方法对整个队形也有明确的定义,可以对其进行数学分析,从而保证队形的稳定性,并且适用于三维环境中。但从现有的多 AUV 主从式编队控制文献看,多 AUV 编队多为二维的情况,不能很好地体现真实的三维海洋环境,如崔荣鑫和 Ge 等提出的欠驱动的主从式编队控制^[7],崔海英等提出的用模糊推理系统获得避障角度实现避障^[8]的控制等皆为二维编队。本文针对三维水下环境进行了研究,提出了一种基于反步控制(backstepping control)^[9]和人工势场(artificial potential field)^[10]的多 AUV 三维主从式编队与避障方法。该方法利用领航者的位置信息^[11],引入反步控制实现跟随 AUV 对虚拟 AUV 的轨迹跟踪,实现三维水下编队控制,而且结合人工势场的方法变换队形,有效地避开障碍物。

1 编队控制

本文采用主从式编队控制方法,在反步控制基础上,设计运动学编队控制律。利用领航 AUV 的位置信息,得到虚拟 AUV 的位置及速度信息,作为跟随 AUV 的期望状态量;随后为跟随 AUV 设计运动学编队控制律,使其跟踪虚拟 AUV 的轨迹;最后进行多 AUV 编队控制的仿真,验证算法的有效性。图 1 给出了运动学编队控制系统框图。

① 国家自然科学基金(51279098),上海市科委创新行动计划(13510721400)和上海市教委科研创新研究重点项目(13ZZ123)资助。

② 男,1989 年生,硕士生;研究方向:多 AUV 编队航行控制算法研究;E-mail: chndgh@163.com

③ 通讯作者,E-mail: zdq367@aliyun.com.cn

(收稿日期:2013-11-29)

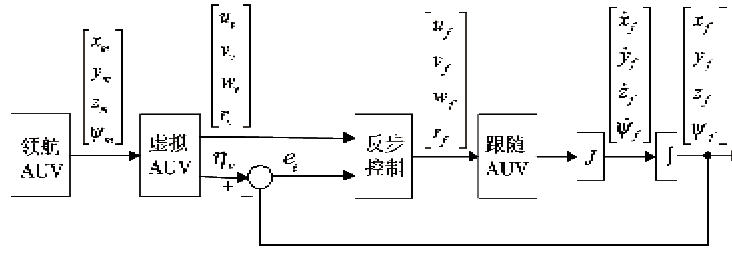


图1 运动学编队控制系统基本结构框图

1.1 基于领航位置信息的虚拟 AUV 设计

利用领航 AUV 位置信息进行虚拟 AUV 的设计,得到其位置量及速度值作为跟随 AUV 编队航行的期望值,从而设计跟随 AUV 编队控制律,控制跟随 AUV 跟踪虚拟 AUV 轨迹,实现期望编队效果。具体编队控制过程参考图 2,编队控制算法设计过程以一组 AUV (包括两个 AUV:领航 AUV、跟随 AUV) 为例进行说明,在仿真过程中将编队控制扩展到包含多 AUV 的系统。

虚拟 AUV 的设计就是由领航 AUV 位置量 η_m 得到虚拟 AUV 的位置量 η_v 和速度量 V_v 的过程。

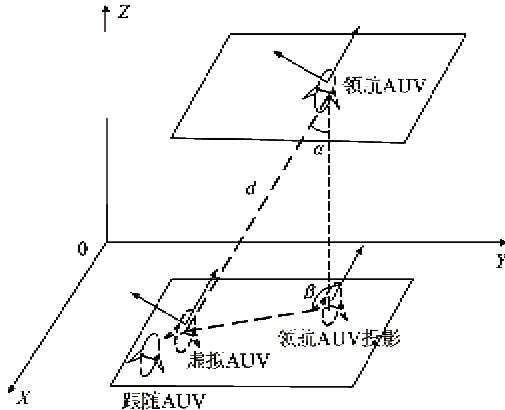


图2 三维领航-跟随结构

1.1.1 虚拟 AUV 参考轨迹量设计

为得到虚拟 AUV 的位置量和速度量,设领航 AUV 的位置信息为 $\eta_m = [x_m \ y_m \ z_m \ \psi_m]^T$, 其中 ψ_m 为领航 AUV 的艏向角。首先根据领航 AUV 的位置量 η_m 得到其参考轨迹量^[8]:

$$\eta_r = \eta_m + R(\psi_m)l \quad (1)$$

式中 $R(\psi_m)$ 为载体坐标系到惯性坐标系的转换矩阵,用式

$$R(\psi_m) = \begin{bmatrix} \cos\psi_m & -\sin\psi_m & 0 & 0 \\ \sin\psi_m & \cos\psi_m & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

表示; $l = [d\sin\alpha\cos\beta, d\sin\alpha\sin\beta, d\cos\alpha, 0]^T$ 为载体坐标系下虚拟 AUV 与领航 AUV 的相对位置; d 为领航 AUV 到虚拟 AUV 的距离, α 为领航与虚拟 AUV 连线和领航与领航 AUV 投影连线的夹角, β 为领航 AUV 进退方向的线速度和领航 AUV 投影与虚拟 AUV 连线的夹角; 0 度表示期望 AUV 与领航 AUV 的艏向角保持一致,具体数值在仿真过程中根据编队任务设定,具体意义参见图 2。

1.1.2 虚拟 AUV 位置量设计

为得到虚拟 AUV 的位置量 η_v 和速度量 V_v , 利用其参考轨迹量 η_r , 并且引入辅助控制变量及相关设计参数,位置量 η_v 具体设计过程如下:

设虚拟 AUV 位置量为 $\eta_v = [x_v \ y_v \ z_v \ \psi_v]^T$, 定义虚拟 AUV 误差量:

$$e_v = \eta_v - \eta_r \quad (2)$$

虚拟 AUV 控制算法设计的目的是通过辅助变量的引入,使得误差量 e_v 为 0。

引入辅助误差变量^[9]

$$r_v = e_v + \phi \quad (3)$$

其中 $\phi = [\phi_1, \phi_2, \phi_3, \phi_4]^T$ 为辅助控制变量, $\phi_i (i = 1, 2, 3, 4)$ 为设计参数,定义辅助控制变量 ϕ 的导为

$$\dot{\phi} = -\beta_1(\phi) - Kr_v \quad (4)$$

其中

$$\beta_1(\phi) = [\lambda_1 \tanh(\phi_1/\lambda_1) \quad \lambda_2 \tanh(\phi_2/\lambda_2) \quad \lambda_3 \tanh(\phi_3/\lambda_3) \quad \lambda_4 \tanh(\phi_4/\lambda_4)]^T,$$

$K = \text{diag}[k_1, k_2, k_3, k_4]$, $\lambda_i, k_i \in \mathbb{R}^+$ 为设计参数。将(3)式带入(4)式,得

$$\dot{\phi} = -\beta_1(\phi) - K(e_v + \phi) \quad (5)$$

定义虚拟 AUV 的位置量微分方程为

$$\dot{\eta}_v = [\dot{x}_v \ \dot{y}_v \ \dot{z}_v \ \dot{\psi}_v]^T = \beta_1(\phi) + \beta_2(\varphi) \quad (6)$$

式中

$$\beta_2(\phi) = [k_1 \tanh(\phi_1/k_1) \quad k_2 \tanh(\phi_2/k_2) \quad k_3 \tanh(\phi_3/k_3) \quad k_4 \tanh(\phi_4/k_4)]^T$$

$\phi_i, k_i (i = 1, 2, 3, 4)$ 为设计参数,与辅助控制变量

ϕ 中 ϕ_i 及 K 中 k_i 设置值相同。

1.1.3 虚拟 AUV 速度量设计

已知在载体坐标系到惯性坐标系的转换关系为 $\dot{\eta} = R(\psi)v$, 则 $v = R^{-1}(\psi)\dot{\eta}$ 。虚拟 AUV 速度量为^[7]

$$V_v = [u_v \ v_v \ w_v \ r_v]^T \\ = R^{-1}(\eta_v)(\beta_1(\phi) + \beta_2(\phi)) \quad (7)$$

将具体的参数带入式(5)和式(7),得到微分方程组:

$$\begin{cases} \dot{\phi}_1 = -\lambda_1 \tanh(\phi_1/\lambda_1) - k_1(x_v - x_r + \phi_1) \\ \dot{\phi}_2 = -\lambda_2 \tanh(\phi_2/\lambda_2) - k_2(y_v - y_r + \phi_2) \\ \dot{\phi}_3 = -\lambda_3 \tanh(\phi_3/\lambda_3) - k_3(z_v - z_r + \phi_3) \\ \dot{\phi}_4 = -\lambda_4 \tanh(\phi_4/\lambda_4) - k_4(\psi_v - \psi_r + \phi_4) \end{cases} \quad (8)$$

$$\begin{cases} \dot{x}_v = \lambda_1 \tanh(\phi_1/\lambda_1) + k_1 \tanh(\phi_1/k_1) \\ \dot{y}_v = \lambda_2 \tanh(\phi_2/\lambda_2) + k_2 \tanh(\phi_2/k_2) \\ \dot{z}_v = \lambda_3 \tanh(\phi_3/\lambda_3) + k_3 \tanh(\phi_3/k_3) \\ \dot{\psi}_v = \lambda_4 \tanh(\phi_4/\lambda_4) + k_4 \tanh(\phi_4/k_4) \end{cases} \quad (9)$$

根据式(8)和式(9),经计算可得到虚拟 AUV 位置量 η_v 和辅助控制变量 ϕ ,结合式(7)可得到虚拟 AUV 速度量 V_v 。

编队控制过程中,进行虚拟 AUV 位置量和速度量计算时,需要设定参数 $\lambda_i, k_i (i = 1, 2, 3, 4)$, 具体设定值见仿真部分,给定领航 AUV 位置信息 η_m 及队形参数 d, α, β , 据式(1)得到参考位置信息 η_r , 并且据此设定虚拟 AUV 初始位置,设定初始时刻 $\phi_i(0) = 0$ 。根据式(8)和式(9),利用 MATLAB/SIMULINK 平台进行微分方程的计算,得到虚拟 AUV 的位置量 η_v 及辅助控制变量 ϕ ,据式(7)得到虚拟 AUV 速度量 V_v ,则可实现仅利用领航 AUV 位置量 η_m 得到虚拟 AUV 的位置量 η_v 和速度量 V_v 。将虚拟 AUV 位置量 η_v 及速度量 V_v 作为跟随 AUV 编队航行期望参考信息,据此为跟随 AUV 设计编队控制律,控制其跟踪虚拟 AUV 的轨迹,实现期望编队控制效果,虚拟 AUV 实现效果在仿真部分中进行分析说明。

1.2 跟踪控制

运动学编队控制系统中,利用领航 AUV 位置信息 η_m 得到虚拟 AUV 速度信息 V_v 及位置信息 η_v 。对反步跟踪控制来说,则将跟随 AUV 实际轨迹 η_f 与虚拟 AUV 轨迹 η_v 的误差量 e_e 和虚拟 AUV 的速度值 V_v 共同作为反步控制的输入。

反步控制方法因其控制性能简单实用,广泛应用于移动机器人中,现将其应用在三维水下环境 AUV 编队控制之中,对应的控制律设计也是基于三维环境的。

由反步控制方法^[12]得到运动学编队控制律为

$$V_f = \begin{bmatrix} u_f \\ v_f \\ w_f \\ r_f \end{bmatrix} = R^T(\eta_f)Ke_e + R(e_\psi)V_v \\ = \begin{bmatrix} k(e_x \cos \psi_f + e_y \sin \psi_f) + (u_v \cos e_\psi - v_v \sin e_\psi) \\ k(-e_x \sin \psi_f + e_y \cos \psi_f) + (u_v \sin e_\psi + v_v \cos e_\psi) \\ w_v + k_z e_z \\ r_v + k_\psi e_\psi \end{bmatrix} \quad (10)$$

式中, k, k_z, k_ψ 为正常系数。

2 编队避障控制

由于海底环境复杂多变,AUV 在编队航行过程中,有可能遇到障碍物,本文考虑在这种情况下的编队控制。对于领航 AUV,当遇到障碍物时,根据当前与障碍物的距离及方向采取避障措施;而 AUV 编队则需要变换队形以通过障碍物区域,变换队形的过程中,跟随 AUV 根据领航 AUV 的位置和轨迹变化来调整与领航 AUV 之间的相对位置,最终以直线队形通过障碍物区域。此处引入人工势场方法^[13]实现多 AUV 队形变化与避障。

借用陆地移动机器人的引力势场设计方法^[14],设三维空间中有一静止目标点 $g(x_1, x_2, x_3)$ 和机器人 $r(y_1, y_2, y_3)$ 。定义空间内机器人与目标物距离函数为

$$\rho(r, g) = \|r(y_1, y_2, y_3) - g(x_1, x_2, x_3)\| \quad (11)$$

其产生的引力场为

$$U_{att}(\rho(r, g)) = \xi \|\rho(r, g)\|^m \quad (12)$$

其中 m 是正常数,其取值决定了势场函数曲线的形状。如果 $m = 1$,会使求导后出现引力无界情况,造成机器人在目标点抖动^[14]。此处取 $m = 2, \xi$ 是目标势场系数。目标吸引力为

$$F_{att} = -\nabla U_{att}(\rho(r, g)) \\ = m\xi \|r(y_1, y_2, y_3) - g(x_1, x_2, x_3)\|^{m-1} n_{RG} \quad (13)$$

其中 n_{RG} 是机器人到目标的单位矢量。

当目标运动时,将相对速度引入势场模型,目标

点 $g(x_1, x_2, x_3)$ 的速度为 $V_G(t)$, 机器人 $r(y_1, y_2, y_3)$ 的速度为 $V(t)$, 目标与机器人的相对速度为:

$$V_{att}(t) = V_G(t) - V(t) \quad (14)$$

速度分量产生的引力势场为

$$U_{att2}(V_{att}(t)) = \delta \|V_{att}(t)\|^n \quad (15)$$

速度分量产生相应的势场力为

$$\begin{aligned} F_{att2} &= -\nabla U_{att2}(V_{att}(t)) \\ &= n\delta \|V_G(t) - V(t)\|^{n-1} n_{VRG} \end{aligned} \quad (16)$$

其中 n_{VRG} 是垂直于 $V_{att}(t)$ 的单位矢量, 可以取 $n = 2, \delta$ 是常数。

则动态环境下引力势场的合成势场力为

$$F_{att} = F_{att1} + F_{att2} \quad (17)$$

障碍物位置是 $o(z_1, z_2, z_3)$, F_{rep1} 是由机器人和障碍物的距离产生的距离斥力分量, F_{rep2} 是由相对速度 $V(t) - V_{obs}(t)$ 产生的速度斥力分量, 其大小与相对速度大小成正比, 方向垂直于机器人与障碍物的相对距离方向, 亦即相对速度 $V(t) - V_{obs}(t)$ 在垂直于机器人与障碍物的相对距离方向上的分量的反方向。

这里给出斥力势场的距离分量表达式:

$$U_{reps} = \sum_{i=1}^N U_{reps}(\rho_i(r, o)) \quad (18)$$

其中 N 是障碍物的个数, $\rho_i(r, o) = \|r(y_1, y_2, y_3) - o_i(z_1, z_2, z_3)\|$ 是机器人与第 i 个障碍物的距离函数, 则有

$$U_{reps}(\rho_i(r, o)) = \begin{cases} \frac{1}{2}\eta\left(\frac{1}{\rho_i(r, o)} - \frac{1}{\rho(r, g)}\right)^2, & \rho_i(r, o) < \rho(r, g) \\ 0, & \rho_i(r, o) > \rho(r, g) \end{cases} \quad (19)$$

三维空间中第 i 个障碍物的斥力势场的距离分量对应排斥力为

$$F_{reps}(\rho_i(r, o)) = -\nabla U_{reps}(\rho_i(r, o)) \quad (20)$$

则斥力势场的距离分量对应的总的排斥力为

$$F_{reps} = \sum_{i=1}^N F_{reps}(\rho_i(r, o)) \quad (21)$$

速度分量产生的势场为

$$U_{repsv} = \sum_{i=1}^N U_{repsv}(\rho_i(r, o)) \quad (22)$$

其中: $U_{repsv}(\rho_i(r, o)) =$

$$\begin{cases} \lambda \sum_{i=1}^N \|V(t) - V_{obs}(t)\| \sin\theta_i, & \rho_i(r, o) < \rho(r, g) \\ 0, & \rho_i(r, o) > \rho(r, g) \end{cases} \quad (23)$$

式(22)表示第 i 个障碍物的速度分量产生的势场, 相应的势场力为

$$F_{repsvi} = -\nabla U_{repsv}(\rho_i(r, o)) \quad (24)$$

$$F_{repsv} = \sum_{i=1}^N F_{repsvi} = -\sum_{i=1}^N \nabla U_{repsv}(\rho_i(r, o)) \quad (25)$$

其中 θ_i 是机器人与障碍物的和速度与距离斥力分量的夹角, λ 是常数系数。

本文利用指数函数作为势场函数的方法。该势场函数的结构为^[15]

$$U(\rho(r, g)) = \alpha \exp(-X) \quad (26)$$

在静态环境下, 对于引力场, X 的表达式为 $X = X_{r,g} = \beta \|\rho(r, g)\|^m$; 对于斥力场, X 的表达式为 $X = X_{r,o} = \gamma \|\rho(r, o)\|^n$, 合力的表达式为

$$\begin{aligned} F &= F_{att} + F_{rep} \\ &= -\nabla U_{att}(r, g) - \nabla \sum_{i=1}^N U_{reps}(\rho_i(r, o)) \\ &= m\alpha \exp(\beta \|\rho(r, g)\|^m) n_{RG} \\ &\quad + m \sum_{i=1}^N \alpha \exp(-\gamma \|\rho(r, o_i)\|^n) n_{o_iR} \end{aligned} \quad (27)$$

其中, n_{RG} 是机器人指向目标的单位矢量, n_{o_iR} 是第 i 个障碍物指向机器人的单位矢量, 采用指数函数方法, 人工势场仍然是距离的函数, 与常规势场函数不同的是, 功能函数是指数曲线而非二次曲线。根据指数函数的特点, m 和 n 的取值大于 1, β 和 γ 均是大于 0 的常数系数, 所以 $X > 0$ 。

3 编队控制及避障仿真

本文的算法是基于上海海事大学水下机器人与智能系统实验室的海事一号 AUV, 该机器人一共包含 5 个推进器, 水平面 4 个, 垂直面 1 个, 能够进行 4 个自由度运动: 进退, 横移, 潜浮, 回转。

3.1 轨迹跟踪仿真

设定领航 AUV 的航行轨迹为螺旋线: $\eta_m = [x_m \ y_m \ z_m \ \psi_m]^T$, $x_m(t) = 1.3 * \sin(0.2 * t)$; $y_m(t) = -1.3 * \cos(0.2 * t)$; $z_m(t) = 0.2 * t + 0.4$; $\psi_m(t) = 0.5 * t$ 。仿真环境设置为: $3m \times 3m \times 4.5m$ 的三维环境。队形参数设置如下: $d = 0.5m$, $\alpha = \frac{\pi}{4}$, $\beta = \frac{2\pi}{3}$, $\lambda_1 = 2$, $\lambda_2 = 1$, $\lambda_3 = 4$, $\lambda_4 = 0.5$, $k_1 = 2$, $k_2 = 1$, $k_3 = 2$, $k_4 = 0.1$ 。设定仿真时间为 20s, t 从 0 时刻开始运行, 领航 AUV 的起始位置为 $\eta_m(0) = [0 \ -1.3 \ 0.4 \ 0]^T$ 。

通过主从式编队控制得到虚拟 AUV 的速度及位置信息之后,将其输入到轨迹跟踪控制器模块。仿真环境设置为:3m×3m×4.5m 的三维环境,跟随 AUV 的起始位置为 $\eta_f(0) = [0.5 \ 0 \ 0 \ 0]^T$ 运动学控制律参数设置为: $k = 1, k_z = 2, k_\psi = 2$, 设定仿真时间为 20s, 仿真结果如图 3 所示。

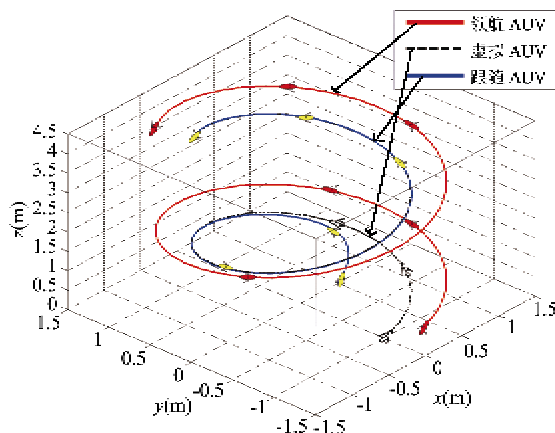


图 3 轨迹跟踪仿真结果图

图 4 所示为轨迹跟踪和跟随过程中距离 d 的变化。轨迹跟踪过程中, $t = 0$ 时刻, 虚拟 AUV 的位置为 $\eta_v(0) = [0.01 \ -1.03 \ 0 \ 0]^T$, 跟随 AUV 的初始位置为 $\eta_f(0) = [0.5 \ 0 \ 0 \ 0]^T$, 距离 d 为 1.14m, $t = 8$ s 时刻, 距离趋近于 0m, 并稳定在 0m, 表明跟随 AUV 对虚拟 AUV 实现跟踪; 跟随过程中, 从 $t = 8$ s 时刻到仿真结束, 距离一直稳定在 0.5m, 表明跟随 AUV 对领航 AUV 实现跟随。验证了该跟随算法与跟踪算法的有效性。

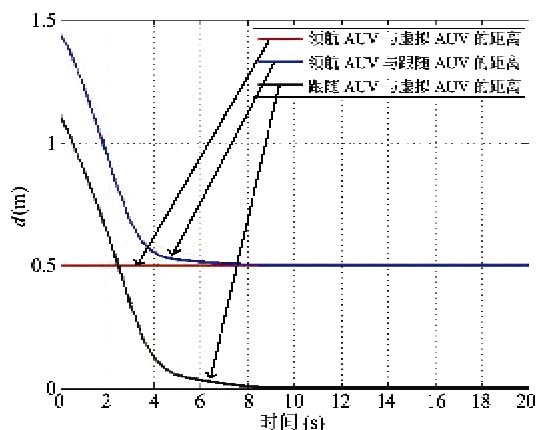


图 4 编队与跟踪距离变化图

3.2 7AUV 编队仿真

实现了两个 AUV 的编队控制, 接下来将其扩展

到 7 个 AUV 的编队控制。首先给出领航 AUV 的位置信息, 设定领航 AUV A_0 的航行轨迹为螺旋线: $\eta_m = [x_m \ y_m \ z_m \ \psi_m]^T$, $x_m = 5 * \sin(0.2 * t)$; $y_m = -5 * \cos(0.2 * t)$; $z_m = 0.15 * t$; $\psi_m = 0.2 * t$ 。跟随 AUV 6 个, 分别为 $A_1, A_2, A_3, A_4, A_5, A_6$ 。仿真环境设置为: 16m×16m×11m 的三维环境, A_1, A_2 跟随 A_0, A_4 跟随 A_2, A_6 跟随 A_4, A_3 跟随 A_1, A_5 跟随 A_3 , 对于 A_0, A_2, A_4, A_6 , 队形参数设置为: $d = 1.5\text{m}, \alpha = \frac{\pi}{4}, \beta = -\frac{2\pi}{3}, \lambda_1 = 2, \lambda_2 = 1, \lambda_3 = 4, \lambda_4 = 0.5, k_1 = 2, k_2 = 1, k_3 = 2, k_4 = 0.1$; 对于 A_0, A_1, A_3, A_5 , 队形参数设置为: $d = 1.5\text{m}, \alpha = \frac{\pi}{4}, \beta = \frac{2\pi}{3}, \lambda_1 = 2, \lambda_2 = 1, \lambda_3 = 4, \lambda_4 = 0.5, k_1 = 2, k_2 = 1, k_3 = 2, k_4 = 0.1$; 运动学控制律参数设置为: $k = 1, k_z = 2, k_\psi = 2$ 。

A_0 首位置为 (0 -5 0 0), A_1 首位置 (-1 -4 -1 0), A_2 首位置 (-1 -6 -1.06 0), A_3 首位置 (0 -3 -2.12 0), A_4 首位置 (-1 -7 -2.12 0), A_5 首位置 (-1 -2 -3.18 0), A_6 首位置 (-2 -8 -3.18 0), 设定仿真时间为 50s, 结合以上两个过程的仿真, 结果如图 5 所示。

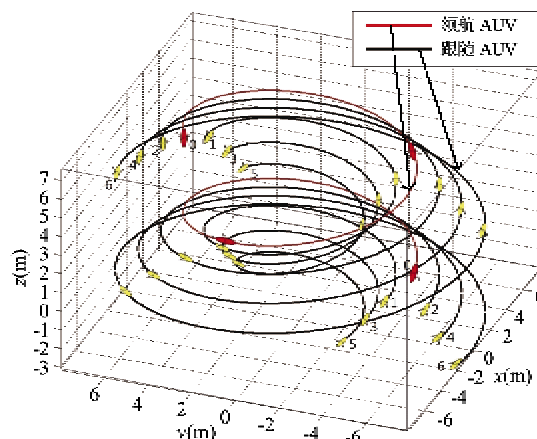


图 5 7AUV 螺旋编队控制

图 5 中, 1、2 号 AUV 跟随领航 AUV (编号为 0), 4 跟随 2, 6 跟随 4, 3 跟随 1, 5 跟随 3, 领航 AUV 的航行信息决定了整个编队的队形及航行情况, 结合上文中对跟随过程和跟踪过程, 从图中可以看出很好地实现了螺旋编队控制。

3.3 7AUV 避障仿真

避障仿真中, 将 AUV 的主从式编队与人工势场结合起来, 把领航 AUV 视为人工势场中唯一的机器

人,其他 AUV 跟随领航 AUV,按照既有的算法进行编队。障碍物圆心坐标点为(22,25,23),(15,15,14),(8,8,12),半径为 1,目标点圆心坐标为(35,25,14),半径为 1,AUV 以 V 型编队航行,当接近障碍物区域时,根据势场函数(27),取 $m = 2$,在引力场中取 α 为 60, β 为 0.01,斥力场中取 α 为 5.5, γ 为 1.5。以领航 AUV 当前位置为圆心,半径为 1 画圆,将该圆水平方向 360 度 30 等分,垂直方向 180 度 15 等分,然后遍历,找到一个合力最大的点即为领航 AUV 下一时刻前进的方向。在障碍物区域,剩余的 AUV 分别沿着领航 AUV 的轨迹呈直线队形航行,当离开障碍物区域时,再呈 V 型编队航行。仿真过程如图 6 所示。

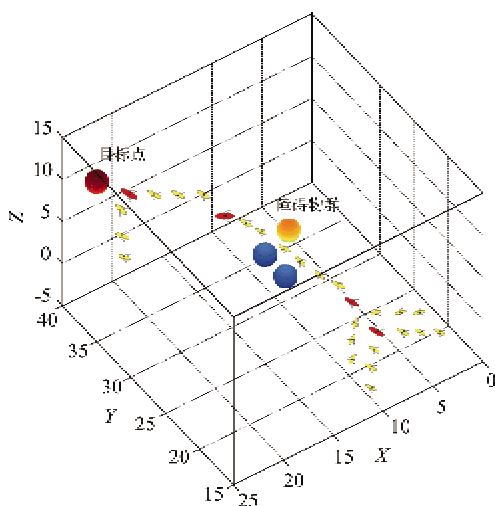


图 6 7AUV 编队避障整体效果图

4 结论

本文从领航 AUV 的位置信息出发,结合主从式编队的控制方法,进行了系统的数学推导,建立了 7AUV 主从式编队控制模型,并模拟复杂的海底环境,加入障碍物因素,引入人工势场的避障算法,改变多 AUV 队形,将多 AUV 原来的 V 型队形变换为直线队形,仿真结果表明,7AUV 能够在很短的时间内从不规则的状态,转换为 V 型编队,当遇到障碍物区域时,能够从 V 型编队转换为直线编队。反应时间快,差错率低,离开障碍物区域时,重新变为 V 型编队。三维的仿真环境能够模拟更加真实的海洋环境。

但是由于实验室条件的限制,本文中提到的 7AUV 的编队模型,只在 MATLAB 仿真环境中得到了验证,并没有进行水池实验。随着研究的不断深

入以及实验条件的不断完善,我们今后将进行海底环境的实验验证,而且不断优化算法,进而使该算法最终能够投入到海底勘探和军事应用等领域。

参考文献

- [1] 徐玉如,李彭超. 水下机器人发展趋势. 自然杂志, 2011, 33(3): 125-132
- [2] 余琨,徐国华,肖治骥等. 多 AUV 协作系统研究现状与发展综述. 航海工程,2009,38(5):134-137
- [3] Liu S, Tan D, Liu G. Distributed formation control of robots with directive visual measurement. In: IEEE International Conference on Mechatronics and Automation, Ontario, Canada, 2005. 1760-1765
- [4] Balch T, Arkin R. C. Behavior-based formation control for multi-robot teams. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 1998, 14(6): 926-939
- [5] Lewis M A, Tan K H. High precision formation control of mobile robots using virtual structures. *Autonomous Robots*, 1997, 4(4): 387-403
- [6] 吴小平,冯正平,朱继慈. 多 AUV 队形控制的新方法. 船舶科学技术, 2008, 30(2): 128-134
- [7] Cui R, Ge S S, Voon Ee How B, et al. Leader-follower formation control of underactuated AUVs with leader position measurement. In: IEEE International Conference on Robotics and Automation, Kobe, Japan, 2009. 979-984
- [8] 崔海英,郭建军等. AUV 在障碍物环境下的编队控制. 声学技术,2009,28(4):17-20
- [9] 孙兵,朱大奇,邓志刚. 开架水下机器人生物启发离散轨迹跟踪控制. 控制理论与应用, 2013, 30(4): 454-462
- [10] 李欣,朱大奇. 基于人工势场法的自治水下机器人路径规划. 上海海事大学学报. 2010, 31(2): 35-39
- [11] 崔荣鑫,徐德民,严卫生等. 仅利用位置信息的自主水下航行器主从式编队控制方法. 兵工学报, 2008, 29(8): 980-984
- [12] Fierro R, Lewis F L. Control of nonholonomic mobile robot: backstepping kinematics into dynamics. *Journal of Robotic Systems*, 1997, 14(3): 149-164
- [13] 范海洲,陈伟海,刘敬猛等. 用于移动机器人路径规划的曲线轨迹算法. 高技术通讯, 2011, 21(5): 516-522
- [14] Ge S S, Cui Y J. Dynamic motion planning for mobile robots using potential field method. *Autonomous Robots*, 2002, 13(2): 207-222
- [15] 吕冬梅,颜秉勇,刘喜梅. 基于 consensus 的人工势能在足球机器人避障中的应用. 高技术通讯, 2007, 17(7): 714-718

Control of leader-follower formation and obstacle avoidance for Multi-AUV

Ding Guohua, Zhu Daqi

(Lab. of Underwater Vehicles and Intelligent Systems, Shanghai Maritime University, Shanghai 201306)

Abstract

The control of leader-follower formation of autonomous underwater vehicles (AUVs) was studied, and a method for three-dimensional formation and obstacle avoidance for multi-AUV based on backstepping control and artificial potential field was presented, and its simulations of the formation control and the obstacle avoidance for seven AUVs were conducted. The method uses the leader's position information and introduces the backstepping control to realize the follower AUV's tracking of the virtual AUV to achieve three dimensional underwater formation control, and combines with the artificial potential field method to transform the AUV formation to effectively avoid obstacles. The simulation results showed that the presented algorithm achieved the expected control effect, and verified the validity and the practicability of the algorithm.

Key words: autonomous underwater vehicle (AUV), leader-follower, formation control, backstepping control, artificial potential field, obstacle avoidance