

doi:10.3969/j.issn.1673-4785.2011.03.009

# 采用一致性算法与虚拟结构的 多自主水下航行器编队控制

袁健, 唐功友

(中国海洋大学 信息科学与工程学院, 山东 青岛 266100)

**摘要:**采用一致性算法与虚拟结构法研究了多自主水下航行器(AUV)小尺度编队控制问题. 首先针对各自主水下航行器拥有不同虚拟领航者信息(参考信息)的情况, 通过对各 AUV 拥有的不一致参考信息进行一致性协商而达到状态一致. 其次, 基于虚拟结构思想采用坐标变换将各 AUV 相对于虚拟领航者的相对位置转换为各自的期望位置, 并设计了一种有限时间跟踪控制律以确保各 AUV 能在有限时间内跟踪上其期望轨迹, 从而实现了多 AUV 的小尺度有限时间编队控制. 最后仿真实验验证了控制策略的有效性.

**关键词:**自主水下航行器; 编队控制; 一致性算法; 虚拟领航者

**中图分类号:**TP24 **文献标识码:**A **文章编号:**1673-4785(2011)03-0248-06

## Formation control of autonomous underwater vehicles with consensus algorithms and virtual structure

YUAN Jian, TANG Gongyou

(College of Information Science and Engineering, Ocean University of China, Qingdao 266100, China)

**Abstract:** The small-scale formation control of autonomous underwater vehicles (AUVs) was investigated with consensus algorithms and virtual structure. Firstly, considering the inconsistent virtual-leader information (reference information) for each AUV, a consensus algorithm was adopted to negotiate the inconsistent reference information for each AUV, helping them reach a consistent state. Secondly, the relative positions to the virtual leader were transformed into their desired positions with coordinate transformation based on virtual structure, and a control law was proposed to make the AUVs track the desired trajectories in finite time. The small-scale formation control for AUVs in finite-time was carried out. Finally, Experimental results were provided to demonstrate the effectiveness of the proposed methods.

**Keywords:** autonomous underwater vehicle; formation control; consensus algorithms; virtual leader

多自主式水下航行器的协同作业可以显著提高 AUV 在海洋采样、成像、监视和通信等众多应用方面的能力. 目前关于多 AUVs 编队控制的研究结果主要借鉴了陆地多机器人(或多智能体)协同控制策略<sup>[1-7]</sup>. 与陆地多机器人编队控制相比, 在信号传输方面 AUVs 所采用的通讯介质为水声, 随着通讯距离的增加通信质量显著下降, 主要表现在信号的延迟、衰减和失真<sup>[1-3]</sup>. 多 AUV 编队控制要求系统最终能够实现预先定义的编队形状, 可将多 AUV 系统建模为多智能体系统, 采用一致性算法<sup>[8-14]</sup>研究其

位置和姿态的一致性问题.

本文针对在不一致参考信息情形下多 AUVs 的通信时延和数据掉包问题, 研究了多 AUVs 基于一致性算法和虚拟结构的编队控制问题. 首先, 采用一致性算法对各 AUV 拥有的不同虚拟领航者信息进行处理, 通过对这些不一致参考信息进行一致性协商而达到状态一致; 针对数据掉包问题, 将多 AUVs 通信网络建模转换为切换拓扑的一致性问题, 研究切换拓扑情形下的一致性跟踪问题. 其次, 将各 AUV 相对于虚拟领航者的相对位置转换为各 AUV 的期望位置, 并设计了一种有限时间跟踪控制律以确保各 AUV 能在有限时间内跟踪上期望轨迹. 最后以 3 个 AUV 构成的通信网络为例, 仿真实验验证了控制

收稿日期: 2010-05-26.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61074092).

通信作者: 袁健. E-mail: jyuanyuan801209@163.com.

策略的有效性.

## 1 问题描述

在多 AUV 系统中,个体 AUV 动态描述如下:

$$\dot{\mathbf{x}}_i(t_k) = \mathbf{u}_i(t_k), i \in P. \quad (1)$$

式中:  $\mathbf{x}_i(t_k) = [x^i(t_k) \ y^i(t_k) \ \theta^i(t_k)]^T \in \mathbf{R}^3$ , 其中  $x^i(t_k)$ 、 $y^i(t_k)$ 、 $\theta^i(t_k)$  分别表示  $t_k$  时刻各个 AUV 所拥有的虚拟领航者的位置和驶向角;  $\mathbf{u}_i(t_k)$  为相应维数向量, 表示  $t_k$  时刻控制输入;  $P = \{1, 2, \dots, p\}$  表示所有 AUV 的集合.

对于系统(1), 可以取控制输入为

$$\mathbf{u}_i(t_k) = \sum_{v_j \in N_i^k} a_{ij}(\mathbf{x}_j(t_k) - \mathbf{x}_i(t_k)).$$

式中:  $N_i^k$  表示  $t_k$  时刻个体  $i$  的邻居个体集;  $a_{ij} > 0$  为有向图  $G = (V, E)$  的邻接矩阵  $A$  的邻接权重.

式(1) 的紧凑形式为

$$\dot{\mathbf{x}}(t_k) = -\mathbf{L}\mathbf{x}(t_k). \quad (2)$$

式中:  $\mathbf{x}(t_k) = [x_1(t_k) \ x_2(t_k) \ \dots \ x_p(t_k)]^T$ ;  $\mathbf{L}$  为有向图的 Laplacian 矩阵并且  $\mathbf{L} = \mathbf{D} - \mathbf{A}$ ,  $\mathbf{D} = \sum_{j=1, j \neq i}^p a_{ij}$  为常数矩阵.

给出下面的定义和引理.

**定义 1** 如果对于每一个 AUV 节点对  $(v_i, v_j)$ ,  $v_i, v_j \in V$  ( $V$  为边集), 当  $t_k \geq t_e$  时都有  $\|\mathbf{x}_i(t_k) - \mathbf{x}_j(t_k)\| = 0$ , 则称 AUV 构成的网络  $G = (V, E)$  在  $t_k \geq t_e$  时处于一致性状态.

**引理 1**<sup>[13]</sup> 网络拓扑结构固定不变时, 当且仅当网络图包含一个生成树, 式(2) 所描述的系统渐近达到一致.

## 2 基于一致性的多 AUV 系统编队控制算法

### 2.1 具有动态参考信息的一致性算法

对于在较长时间内, 各 AUV 获取的参考信息是时变的, 故需要研究具有动态参考信息的一致性问题. 各 AUV 所拥有的参考信息的由于信号失真, 可能导致略有偏差, 则对虚拟领航者进行协商的一致性算法为:

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{x}}(t_k) &= \sum_{v_j \in N_i^k} a_{ij}(\mathbf{x}_j(t_k) - \mathbf{x}_i(t_k)), i \in f; \\ \dot{\mathbf{x}}_i(t_k) &= \sum_{v_j \in N_i^k} a_{ij}(\mathbf{x}_j(t_k) - \mathbf{x}_i(t_k)) + \\ &\quad b_{i0}(\mathbf{x}_0(t_k) - \mathbf{x}_i(t_k)), i \in l. \end{aligned} \quad (3)$$

式中:  $f$  为所有跟随者的集合;  $l$  为所有领航者的集

合;  $\mathbf{x}_0(t_k)$  满足  $\dot{\mathbf{x}}_0(t_k) = f(\mathbf{x}_0(t_k))$ ;  $b_{i0} > 0$ .

网络环境下的数据掉包会导致系统收敛速度下降. 数据掉包示意图如图 1 所示, 图中  $t_{k+n_i}^i$  代表 AUV( $i$ ) 的第  $k+n_i$  个更新时刻. 只要通信信号丢失则视该链路失效(数据掉包), 即此时通信拓扑发生变化, 可以将其建模转换为切换拓扑的一致性问题来研究.

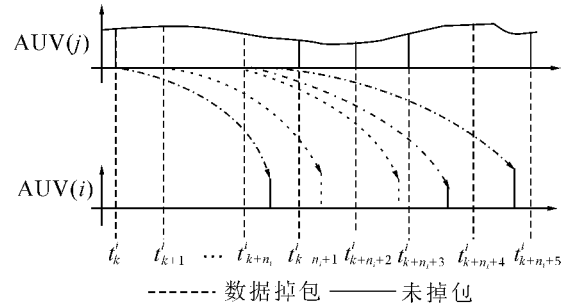


图1 AUV( $j$ ) 时延和数据掉包

Fig. 1 Time-delay and data-dropout of AUV ( $j$ )

### 2.2 多 AUV 系统编队控制算法

建立 2 个平面直角坐标系, 分别为  $X$ - $O$ - $Y$  坐标系和虚拟领航者本体坐标系  $\mathbf{v}^T$ - $o$ - $\mathbf{v}$ . 定义  $(X_{ix}, X_{iy})$  为 AUV( $i$ ) 的实际位置,  $(X_{ix}^d, X_{iy}^d)$  为 AUV( $i$ ) 的期望位置. 则可以将 AUV( $i$ ) 在  $\mathbf{v}^T$ - $o$ - $\mathbf{v}$  坐标系下的坐标转换为  $X$ - $O$ - $Y$  坐标系下的坐标, 其表示为

$$\begin{bmatrix} X_{ix}^d \\ X_{iy}^d \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_i \\ y_i \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \cos \theta^i & -\sin \theta^i \\ \sin \theta^i & \cos \theta^i \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_f^i \\ y_f^i \end{bmatrix}.$$

式中:  $[x_i \ y_i]^T$  表示 AUV( $i$ ) 所具有的虚拟领航者的位置;  $[x_f^i \ y_f^i]^T$  表示 AUV( $i$ ) 相对于编队几何中心的期望偏离量, 如图 2 所示.

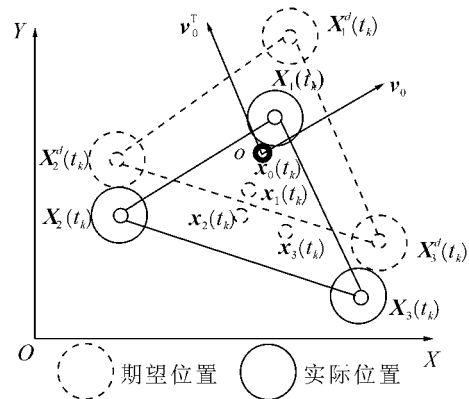


图2 基于一致性的编队控制

Fig. 2 Consensus-based formation control

因此 AUV( $i$ ) 平面内运动学方程为

$$\dot{\mathbf{p}}_i = \begin{bmatrix} \dot{X}_{ix} \\ \dot{X}_{iy} \\ \dot{\zeta}_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \zeta_i & 0 \\ \sin \zeta_i & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \mathbf{q}_i.$$

式中:  $\mathbf{p}_i = [X_{ix} \ X_{iy} \ \zeta_i]^T$  表示 AUV( $i$ ) 的运动状态;

$q_i = [v_i \ \omega_i]^T$  表示控制输入,  $v_i, \omega_i$  分别为 AUV( $i$ ) 的线速度和角速度;  $\zeta_i = \arctan(\dot{X}_{iy}/\dot{X}_{ix})$  为驶向角。

轨迹跟踪问题就是要找到  $v_i, \omega_i$  的控制律使 AUV( $i$ ) 跟踪参考轨迹  $[X_{ix}^d \ X_{iy}^d \ \theta^i]^T$  和参考速度输入  $v_i^d, \omega_i^d$ , 如图 3 所示。

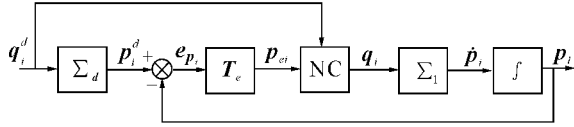


图3 轨迹跟踪控制

Fig. 3 Trajectory-tracking control

在机器人本体坐标系下的位姿误差定义为

$$p_{ei} = \begin{bmatrix} x_{ei} \\ y_{ei} \\ \theta_{ei} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \zeta_i & \sin \zeta_i & 0 \\ -\sin \zeta_i & \cos \zeta_i & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_{ix}^d - X_{ix} \\ X_{iy}^d - X_{iy} \\ \theta^i - \zeta \end{bmatrix} = T_e \begin{bmatrix} X_{ix}^d - X_{ix} \\ X_{iy}^d - X_{iy} \\ \theta^i - \zeta \end{bmatrix}. \quad (4)$$

式中:  $T_e$  为从惯性坐标系到机器人本体坐标系的转换矩阵. 对式(4)求时间导数, 误差的动力学方程可以写为<sup>[15]</sup>:

$$\begin{aligned} \dot{x}_{ei} &= \omega_i y_{ei} - v_i + v_i^d \cos \theta_{ei}, \\ \dot{y}_{ei} &= -\omega_i x_{ei} + v_i^d \sin \theta_{ei}, \\ \dot{\theta}_{ei} &= \omega_i^d - \omega_i. \end{aligned} \quad (5)$$

移动机器人运动学模型的有限时间轨迹跟踪问题即通过控制输入  $q_i$ , 使得对任意初始误差  $[x_{ei}(0) \ y_{ei}(0) \ \theta_{ei}(0)]^T$ , 方程式(5)的闭环轨迹在有限时间收敛到 0, 即  $\lim_{t \rightarrow t_s} \|[x_{ei} \ y_{ei} \ \theta_{ei}]^T\| = 0$ . 跟踪控制系统框图如图 3 所示, 其中参考轨迹  $p_i^d$  是参考输入  $q_i^d$  通过参考系统得到的系统输出, NC 为非线性控制器,  $\Sigma_1$  为受控 AUV 系统(4),  $\Sigma_d$  为参考系统的运动学方程:

$$\dot{p}_i^d = \begin{bmatrix} \dot{X}_{ix}^d \\ \dot{X}_{iy}^d \\ \dot{\theta}^i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta^i & 0 \\ \sin \theta^i & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} q_i^d.$$

### 3 轨迹跟踪控制器设计

**引理 2** 线性系统  $\dot{x} = u$  可被控制器  $u = \xi_1 x + \xi_2 \operatorname{sgn}(x)$  在有限时间内镇定, 其中  $\xi_1, \xi_2 < 0$ .

实际上该系统有这样的特性: 对初态为  $x(0) \neq 0$  的状态  $x(t)$ , 系统将在有限时间  $t_s$  内到达  $x = 0$ , 其中  $t_s = -\ln(\xi_2/(\xi_2 - \xi_1 x_0 \operatorname{sgn}(x)))/\xi_1$ .

考虑到移动机器人运动学模型特性, 将有限时间控制技术应用于移动机器人的跟踪控制, 可按如下设计步骤进行。

下设计步骤进行。

对系统(4)的状态  $\theta_{ei}$  进行一阶系统有限时间控制设计, 选择  $\omega_i$  的控制律为

$$\omega_i = \omega_i^d + k_1 \theta_{ei} + k_2 \operatorname{sgn}(\theta_{ei}). \quad (6)$$

式中:  $k_1, k_2 > 0$ , 则有  $\dot{\theta}_{ei} = -k_1 \theta_{ei} - k_2 \operatorname{sgn}(\theta_{ei})$ . 因此由引理 2 知, 系统(4)在有限时间  $t_\theta$  内到达  $\theta_{ei} = 0$ , 其中  $t_\theta = -\ln(k_2/(k_2 - k_1 \theta_{i0} \operatorname{sgn}(\theta_{ei}))) / k_1$ , 且系统(4)在有限时间  $t_\theta$  内到达  $\omega_i = \omega_i^d$ .

对系统(4)在  $t > t_\theta$  时, 只需考虑另 2 个状态的控制设计. 由于变结构控制的存在, 导致  $\theta_{ei}$  在平衡点附件有小的抖振, 即  $\theta_{ei} \in \{|\theta_{\max}|, -|\theta_{\max}|\}$ , 故此时原系统可写为:

$$\begin{aligned} \dot{x}_{ei} &= \omega_i^d y_{ei} - v_i + v_i^d \cos \theta_{ei}, \\ \dot{y}_{ei} &= -\omega_i^d x_{ei} + v_i^d \sin \theta_{ei}. \end{aligned} \quad (7)$$

由于  $\theta_{ei}$  为在平衡态附近变化的小量,  $v_i^d(t)$  连续有界, 故  $v_i^d \sin \theta_{ei} \rightarrow 0$ , 所以式(7)可以化简为:

$$\begin{aligned} \dot{x}_{ei} &= \omega_i^d y_{ei} - v_i + v_i^d \cos \theta_{ei}, \\ \dot{y}_{ei} &= -\omega_i^d x_{ei}. \end{aligned}$$

因此可将状态  $\theta_{ei}$  首先调整为 0, 使得状态  $y_{ei}$  的变化完全由  $v_i$  来控制。

下面对状态  $(x_e, y_e)$  组成的线性系统进行设计。

**引理 3**<sup>[16]</sup> 双积分线性系统  $\dot{x}_1 = x_2, \dot{x}_2 = u$  可被控制器  $u = -\xi_3 \operatorname{sgn}(x_1) |x_1|^{\alpha_1} - \xi_4 \operatorname{sgn}(x_2) |x_2|^{\alpha_2}$  在有限时间内镇定, 其中  $0 < \alpha_1 < 1, \alpha_2 = 2\alpha_1/(1 + \alpha_1)$ .

对子系统(7), 取  $v_i$  的控制律为

$$v_i = v_i^d \cos \theta_{ei} + \omega_i^d y_{ei} + k_3 \operatorname{sgn}(y_{ei}) |y_{ei}|^{\beta_1} + k_4 \operatorname{sgn}(x_{ei}) |x_{ei}|^{\beta_2}. \quad (8)$$

式中:  $k_3, k_4 > 0, 0 > \beta_1 > 1, \beta_2 = 2\beta_1/(1 + \beta_1)$ , 得到子系统闭环形式为:

$$\begin{aligned} \dot{x}_{ei} &= -k_3 \operatorname{sgn}(y_{ei}) |y_{ei}|^{\beta_1} - k_4 \operatorname{sgn}(x_{ei}) |x_{ei}|^{\beta_2}, \\ \dot{y}_{ei} &= -\omega_i^d x_{ei}. \end{aligned} \quad (9)$$

由引理 3 知  $x_{ei}, y_{ei}$  在有限时间到达 0.

由此得到如下定理。

**定理 1** 若  $v_i^d(t) \in [0, \infty)$  连续有界, 且  $\omega_i^d = C \neq 0$ , 则控制律(6)和(8)使得系统(4)状态在有限时间到达零, 且满足闭环系统是有限时间稳定的, 系统(4)在有限时间内能跟踪上参考轨迹。

**证明** 由上述控制律设计过程可知系统(4)在有限时间  $t_\theta$  到达  $\theta_{ei} = 0$ , 下面首先证明系统状态  $x_{ei}$  和  $y_{ei}$  在状态  $\theta_{ei}$  到达  $\theta_{ei} = 0$  这段时间内不会发散, 然后证明状态  $x_{ei}$  和  $y_{ei}$  在  $t > t_\theta$  时子系统(7)一致渐近稳定。

1) 状态  $x_{ei}$  和  $y_{ei}$  在  $t \leq t_\theta$  内的有界性。

将控制律(6)和(8)代入系统(4), 得到如下闭

环系统:

$$\begin{aligned}\dot{x}_{ei} &= k_1 \theta_{ei} y_{ei} + k_2 \operatorname{sgn}(\theta_{ei}) y_{ei} - \\ &k_3 \operatorname{sgn}(y_{ei}) |y_{ei}|^{\beta_1} - k_4 \operatorname{sgn}(x_{ei}) |x_{ei}|^{\beta_2}, \\ \dot{y}_{ei} &= -[\omega_i^d + k_1 \theta_{ei} + k_2 \operatorname{sgn}(\theta_{ei})] x_{ei} + v_i^d \sin \theta_{ei}, \\ \dot{\theta}_{ei} &= -k_1 \theta_{ei} - k_2 \operatorname{sgn}(\theta_{ei}).\end{aligned}$$

取关于状态  $x_{ei}$  和  $y_{ei}$  的 Lyapunov 函数:

$$V_1(x_{ei}, y_{ei}) = \frac{1}{2} x_{ei}^2 + \frac{1}{2} y_{ei}^2,$$

求导数得

$$\begin{aligned}\dot{V}_1(x_{ei}, y_{ei}) &= -k_3 \operatorname{sgn}(y_{ei}) x_{ei} |y_{ei}|^{\beta_1} - \\ &k_4 \operatorname{sgn}(x_{ei}) x_{ei} |x_{ei}|^{\beta_2} - \omega_i^d x_{ei} y_{ei} - v_i^d y_{ei} \sin \theta_{ei}.\end{aligned}\quad (10)$$

由于状态  $\theta_{ei}$  在有限时间到达  $\theta_{ei} = 0$ , 状态  $\theta_{ei}$  在任意时间均为有界, 并且假设  $v_i^d$  和  $\omega_i^d$  有界, 则可验证对于式(10), 一定存在合适的  $\eta > 0, \zeta > 0$ , 使得对任意  $\|x_{ei}, y_{ei}\| > \eta$ , 有  $\dot{V}(x_{ei}, y_{ei}) \leq -\zeta V(x_{ei}, y_{ei})$ . 因此, 在  $t \leq t_\theta$  有限时间区间内状态  $x_{ei}$  和  $y_{ei}$  是有界的.

2) 状态  $x_{ei}$  和  $y_{ei}$  在  $t > t_\theta$  的有限时间收敛性.

当  $t = t_\theta$  时,  $\theta_{ei}$  为在  $\theta_{ei} = 0$  附近的小量, 故当  $t > t_\theta$  时由于变结构控制的存在,  $\theta_{ei} \in \{|\theta_{\max}|, -|\theta_{\max}|\}$  并在  $|\theta_{\max}|$  和  $-|\theta_{\max}|$  来回切换, 此时子系统可近似为式(9), 由引理4知  $x_{ei}, y_{ei}$  在有限时间内稳定.

## 4 数值仿真

设某海域有由3个AUV组成的AUV通信网络, 其通信网络拓扑如图4所示. 仿真步长  $\Delta T = 0.01$  s, 仿真时间  $T = 15$  s.

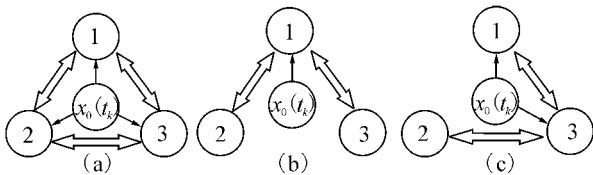


图4 切换拓扑

Fig. 4 Switched topologies

图4(a)所示为全通平衡网络, 并且所有AUV均可获取虚拟领航者的参考信息. 图4(b)中AUV(2)和AUV(3)的通信链路失效, 并且仅有AUV(1)可获取虚拟领航者的参考信息. 图4(c)中AUV(1)和AUV(2)的通信链路失效, AUV(1)和AUV(3)可获取虚拟领航者的参考信息.

设虚拟领航者的参考信息时变特性描述为  $x_0(t_k) = [1 + \cos 2t_k \ 1 + \sin 2t_k \ 1 + 2t_k]^T$ . 设在  $T$  在15 s时间内由于数据掉包而导致通信拓扑在图4(a)~(c)顺序切换, 切换时刻为  $t = 4, 10$  s时, 切换顺序为(a)  $\Rightarrow$  (b)  $\Rightarrow$  (c). 由于达到一致性的必要条

件, 且切换拓扑的并集为平衡图, 所以最终可以达到参考状态的一致性. 一致性协商的仿真结果如图5~10所示. 从图中可以看出0~4 s内, 3个AUV状态达到了一致, 形成了预定的编队形状. 4~10 s内, 由于AUV(2)和AUV(3)无法获取领航者信息, 而AUV(1)可以获取领航者信息; 所以AUV(2)和AUV(3)与AUV(1)相比, 更加偏离领航者状态, 导致本来已经形成的编队形状遭到破坏. 10 s以后, 随着时间的推移, 所有AUV最终达到了一致的状态, 即形成了预定的编队形状.

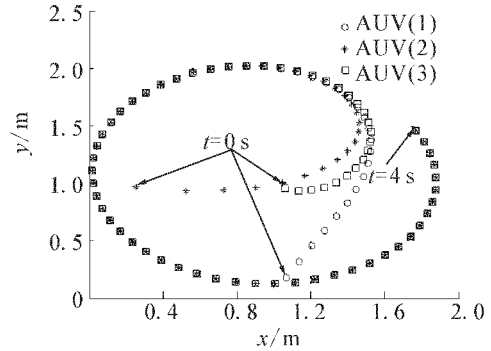


图5 0~4 s时间段虚拟领航者轨迹

Fig. 5 Trajectories of virtual leaders from 0 s to 4 s

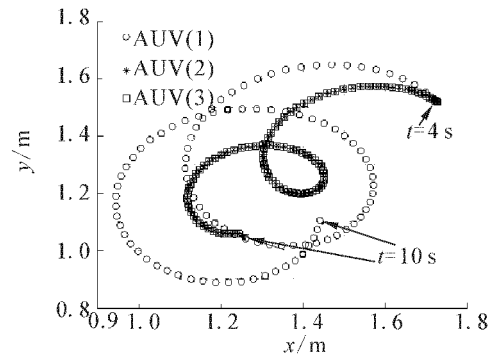


图6 4~10 s时间段虚拟领航者轨迹

Fig. 6 Trajectories of virtual leaders from 4 s to 10 s

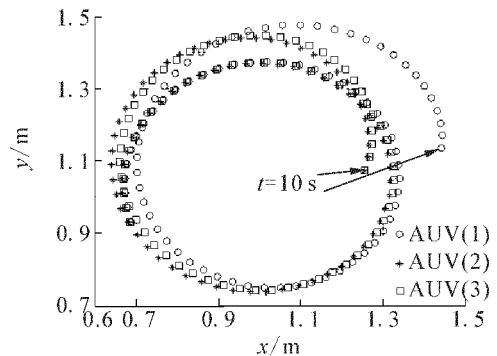
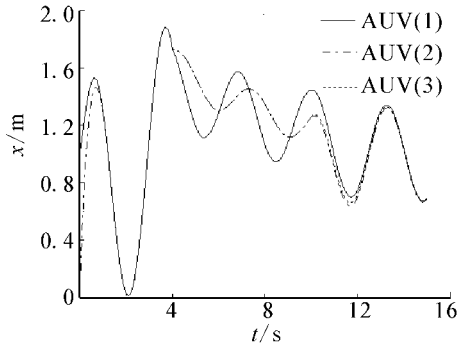
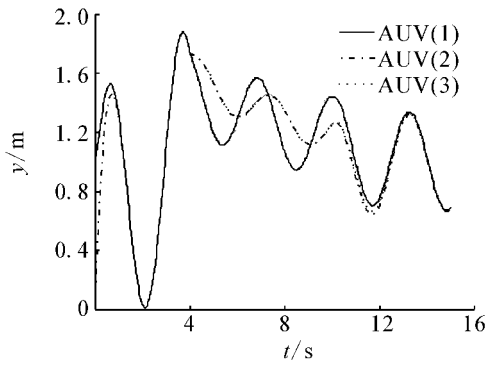
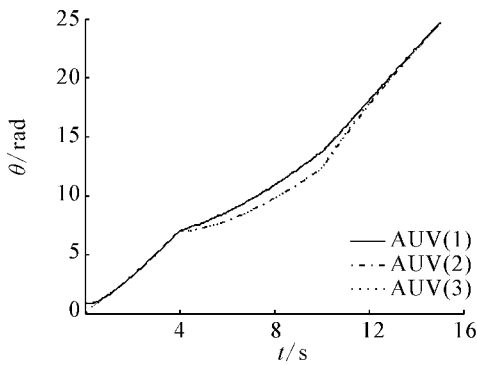


图7 10~15 s时间段虚拟领航者轨迹

Fig. 7 Trajectories of virtual leaders from 10 s to 15 s

图8 切换拓扑下虚拟领航者位置  $x$  一致性Fig. 8 Consensus on position- $x$  of virtual leaders with switched topologies图9 切换拓扑下虚拟领航者位置  $y$  一致性Fig. 9 Consensus on position- $y$  of virtual leaders with switched topologies图10 切换拓扑下虚拟领航者位置  $\theta$  一致性Fig. 10 Consensus on position- $\theta$  of virtual leaders with switched topologies

3个AUV在 $v^T-o-v$ 坐标系下的位置偏离量分别为 $[x_f^1 \ y_f^1]^T = [0 \ 0.1]^T$ ,  $[x_f^3 \ y_f^3]^T = [-0.1\cos \pi/6 \ -0.1\sin \pi/6]^T$ 和 $[x_f^2 \ y_f^2]^T = [0.1\cos \pi/6 \ -0.1\sin \pi/6]^T$ . 虚拟领航者的初始状态为 $x_0(0) = [x^0(0) \ y^0(0) \ \theta^0(0)]^T = [0 \ 0 \ 0]^T$ , 角速度和线速度分别为 $\omega = 2 \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1}$ 、 $v = 1 \text{ m/s}$ , 所以如果 $x_i(t) \rightarrow x_0(t)$ ,  $X_{ix} \rightarrow X_{ix}^d$ ,  $X_{iy} \rightarrow X_{iy}^d$ ,  $i = 1, 2, 3$ 时就可以形成要

求的三角形编队. 图11为三角形编队的虚拟领航者以及各个AUV的参考轨迹, 可以看出3个AUV在虚拟领航者信息取得一致性的同时, 预定的编队形状也即形成. 以AUV(1)跟踪控制为例, 图12~14为0~4 s时间段AUV(1)的跟踪控制效果和控制输入情况, 从仿真结果可知, 在本文控制律作用下AUV(1)在有限时间内能跟踪上期望轨迹.

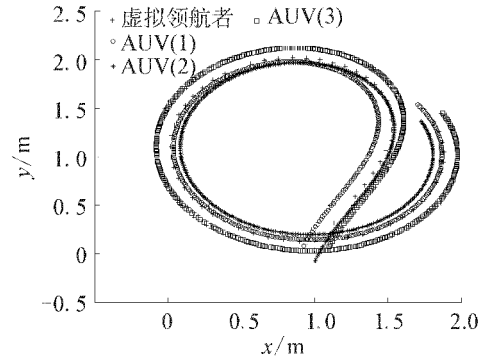


图11 虚拟领航者和各AUV参考轨迹

Fig. 11 Reference trajectories of virtual leader and all AUVs

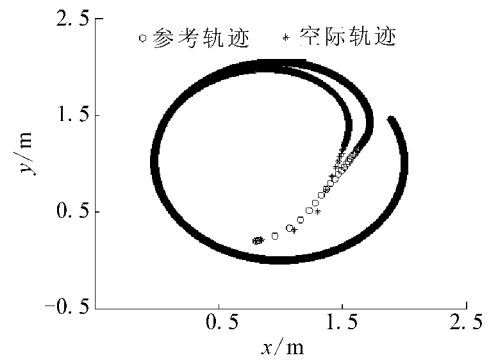


图12 0~4 s时间段AUV(1)及其参考轨迹

Fig. 12 Reference trajectory and actual trajectory of AUV(1)

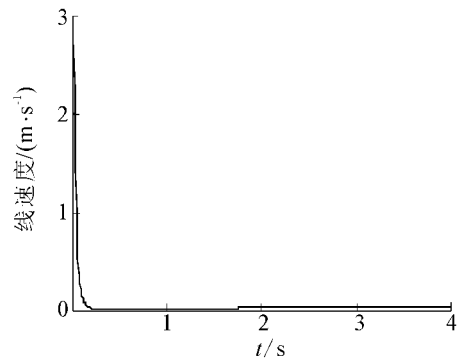


图13 AUV(1)的线速度控制

Fig. 13 Linear velocity control of AUV(1)

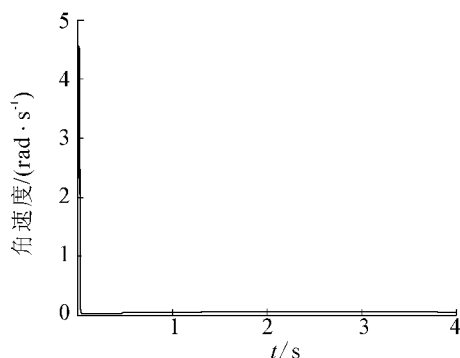


图14 AUV(1)的角速度控制

Fig. 14 Angular velocity control of AUV(1)

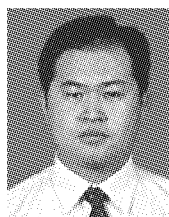
## 5 结束语

本文采用渐近一致性算法和虚拟结构法研究了二维平面内多自主水下航行器小尺度编队控制问题,通过仿真验证了控制策略是有效的.如何将本文控制策略扩展到三维空间6自由度情形是下一步研究的重点.由于所采用的一致性算法是渐近一致的,而控制律为有限时间跟踪控制,导致实际上预定编队形状的形成时间为无穷大;因此如何实现有限时间一致性以及有限时间跟踪控制同步时刻的一致,也是值得研究的问题.

## 参考文献:

- [1] FIORELLI E, LEONARD N, BHATTA P, et al. Multi-AUV control and adaptive sampling in Monterey Bay[J]. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 2006, 31(4): 935-948.
- [2] YU S, URA T. A system of multi-AUV interlinked with a smart cable for autonomous inspection of underwater structures[J]. International Journal of Offshore and Polar Engineering, 2004, 14(4): 264-272.
- [3] YU S, URA T. Experiments on a system of multi-AUV interlinked with a smart cable for autonomous inspection of underwater structures[J]. International Journal of Offshore and Polar Engineering, 2004, 14(4): 273-283.
- [4] XIANG X. Coordinated control for multi-AUV systems based on hybrid automata[C]//Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics. Sanya, China, 2007: 2121-2126.
- [5] TANGIRALA S, KUMAR R, BHATTACHARYYA S, et al. Hybrid-model based hierarchical mission control architecture for autonomous underwater vehicles[C]//American Control Conference. Portland, USA, 2005: 668-673.
- [6] YANG E, GU D. Nonlinear formation-keeping and mooring control of multiple autonomous underwater vehicles[J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2007, 2(2): 164-178.
- [7] KALANTAR S, ZIMMER U. Distributed shape control of homogeneous swarms of autonomous underwater vehicles[J]. Autonomous Robots, 2007, 22(1): 37-53.
- [8] DEGROOT M. Reaching a consensus[J]. Journal of American Statistical Association, 1974, 69(345): 118-121.
- [9] BORKAR V, VARAIYA P. Asymptotic agreement in distributed estimation[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 1982, 27(3): 650-655.
- [10] TSITSIKLIS J, ATHANS M. Convergence and asymptotic agreement in distributed decision problems[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 1984, 29(1): 42-50.
- [11] VICSEK T, CZIROK A, JACOB E, et al. Novel type of phase transitions in a system of self-driven particles[J]. Physical Review Letter, 1995, 75(6): 1226-1229.
- [12] JADBABAIE A, LIN J, MORSE A. Coordination of groups of mobile autonomous agents using nearest neighbor rules[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2003, 48(9): 988-1001.
- [13] OLFATI-SABER R, MURRAY R. Consensus problems in networks of agents with switching topology and time-delays[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2004, 49(9): 1520-1533.
- [14] REN W, BEARD R. Consensus seeking in multi-agent systems under dynamically changing interaction topologies[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2005, 50(5): 655-661.
- [15] KOLMANOVSKY H, MCCLAMROCH N. Developments in nonholonomic controls systems[J]. IEEE Control System Magazine, 1997, 15(6): 20-36.
- [16] HONG Yiguang, XU Yangsheng, HUANG Jie. Finite-time control for robot manipulators[J]. Systems & Control Letters, 2002, 46(4): 243-253.

### 作者简介:



袁健,男,1980年生,博士研究生,主要研究方向为网络化机器人系统编队控制,发表学术论文10余篇。



唐功友,男,1953年生,教授,博士生导师,IEEE高级会员,山东省自动化学会常务理事等.主要研究方向为计算机控制、非线性控制、网络控制系统.承担国家自然科学基金、“863”计划子课题以及省级科研基金等科研项目10余项.曾获国家教委科技进步一等奖1项,国家教委(教育部)科技进步二等奖3项,中国出版协会“优秀学术专著一等奖”1项,山东省第二届优秀科技成果二等奖1项,以及中国海洋大学科技进步二等奖1项等多项荣誉.发表学术论文100余篇,其中被SCI、EI检索60余篇,出版专著1部。