

DOI: 10.3969/j.issn.1673-4785.201304033

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/23.1538.TP.20130621.1541.003.html>

基于卡尔曼滤波的自主式水下航行器大尺度编队控制

袁健^{1,2}, 周忠海^{1,2}, 金光虎^{1,2}, 徐娟^{1,2}, 李俊晓^{1,2}

(1. 山东省海洋环境监测技术重点实验室, 山东 青岛 266001; 2. 山东省科学院海洋仪器仪表研究所, 山东 青岛 266001)

摘要: 针对网络环境下环境噪声对自主式水下航行器编队控制的影响, 提出一种利用卡尔曼滤波实时估计 AUV 最优运动状态的编队控制方法. 将空间间隔较远的多 AUV 系统建模为多智能体系统, 从大尺度上研究其编队控制问题. 为了得到每个 AUV 速度状态的最优估计值, 每个 AUV 都嵌入一个全局卡尔曼滤波器, 利用该全局滤波器进行最优估计从而计算出噪声环境下其自身的最优位置. 仿真结果验证了所给出的控制策略的有效性.

关键词: 自主式水下航行器; 卡尔曼滤波; 一致性; 大尺度编队控制

中图分类号: TP273 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-4785(2013)04-0344-05

中文引用格式: 袁健, 周忠海, 金光虎, 等. 基于卡尔曼滤波的自主式水下航行器大尺度编队控制[J]. 智能系统学报, 2013, 8(4): 344-348.

英文引用格式: YUAN Jian, ZHOU Zhonghai, JIN Guanghu, et al. Large-scale formation control for autonomous underwater vehicles based on Kalman filtering[J]. CAAI Transactions on Intelligent Systems, 2013, 8(4): 344-348.

Large-scale formation control for autonomous underwater vehicles based on Kalman filtering

YUAN Jian^{1,2}, ZHOU Zhonghai^{1,2}, JIN Guanghu^{1,2}, XU Juan^{1,2}, LI Junxiao^{1,2}

(1. Shandong Provincial Key Laboratory of Ocean Environment Monitoring Technology, Qingdao 266001, China; 2. Institute of Oceanographic Instrumentation of Shandong Academy of Sciences, Qingdao 266001, China)

Abstract: Aiming at investigating the influence of environmental noise on autonomous underwater vehicles (AUV) formation control, a formation control for estimating AUV optimal motion states in real time is proposed. We modeled multiple AUVs with larger interval in space as a multi-agent system in order to investigate the large-scale formation control. Each AUV is embedded with one global Kalman filter to obtain the optimal estimation of each AUV speed states. And thus the optimal position of AUV in a noisy environment can be calculated by the optimal estimation with the global filter. Finally, some simulations were demonstrated to show the effectiveness of the proposed formation control scheme.

Keywords: autonomous underwater vehicle; Kalman filtering; consensus; large-scale formation control

多个自主水下航行器的协同控制对于海洋科学考察、海洋开发以及军事应用等方面都具有重要的理论和现实意义. 多自主水下航行器的编队控制是多机器人协调控制中的一个典型科学问题^[1]. 多自主水下航行器的编队控制可以显著提高 AUV 在海洋采样、监视和通信以及海洋环境监测等在内的众

多方面的应用能力. 与空间以及陆地多机器人编队控制技术相比, 水下多 AUV 编队控制非常困难^[2]. 除了 AUV 自身运动控制技术比较难实现外, 在信号传输方面, 水声通信方式随着通信距离的增加, 通信质量显著下降, 主要表现在信号的延迟、衰减和环境噪声对信号的污染^[3]. 信号的衰减和失真, 会导致系统丢失真实系统状态、信号状态的误判; 网络环境下的环境噪声会导致系统状态转化为随机状态^[4-6], 这些影响因素会给系统状态带来不确定性和不稳定性. 因此为了克服或减小不利因素对多 AUV 编队控制的影响, 必须从受环境噪声污染的系统状态中实时估计出动态系统的最优状态.

收稿日期: 2013-04-15. 网络出版日期: 2013-06-21.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61074092); 山东省自然科学基金资助项目(ZR2012FL18); 山东省科学院博士基金项目(201244); 青岛科技发展计划项目(13-+1-4-172-jch); 国际科技合作资助项目(2011DFR60810).

通信作者: 袁健. E-mail: jyuanjian801209@163.com.

本文对于空间相距较远的多 AUV 系统,从大尺度上研究其编队控制问题.将多 AUV 系统建模为多智能体系统,研究其三维空间编队控制问题.考虑到因水下声通信距离的约束,导致多智能体系统的拉普拉斯矩阵 $\mathbf{L}(k)$ 为时变矩阵,故 $\mathbf{A}(k)$ 和 $\mathbf{H}(k)$ 也为时变矩阵.本文为减轻或者克服水下网络环境对多 AUV 系统造成的影响,提出一种 AUV,利用其嵌入的全局滤波器对系统状态进行滤波的编队控制方法,利用卡尔曼滤波器进行系统滤波从而得到每个 AUV 自身运动状态的最优估计值,以此最优估计值构成一致性编队控制律.

1 编队控制问题

有向图 G 描述各 AUV 间的相互通信.设 p 阶加权有向图 $G=(V,E,A)$ 由节点集 $V=\{v_1, v_2, \dots, v_p\}$ 、边集 $E \subseteq V \times V$ 以及加权邻接矩阵 $\mathbf{A}=(a_{ij}) \in \mathbf{R}^{p \times p}$ ($a_{ij} \geq 0$) 构成.在加权有向图 G 中从节点 v_i 到节点 v_j 的有向边可表示为 $e_{ij}=(v_i, v_j) \in E$,节点下标 i 属于一个有限集合 $P=\{1, 2, \dots, p\}$,第 i 个节点代表第 i 个 AUV,邻接矩阵 \mathbf{A} 中对应于 G 的有向边 e_{ij} 的邻接权重 a_{ij} 为正,即 $a_{ij} > 0$.节点 v_i 的邻居节点集表示为 $N_i=\{v_j \in V: (v_i, v_j) \in E\}$,有向边 (v_i, v_j) 表示节点 i 和 j 间的一个有向的信息交换,则称 AUV _{i} 为 AUV _{j} 的邻近 AUV.

为了实现多 AUV 的空间编队,对每个 AUV 进行运动方程建模.对于三维空间 AUV _{i} 运动方程可以用以下方程进行描述:

$$\begin{cases} P_x^i(t_{k+1}) = P_x^i(t_k) + \Delta T v^i(t_k) \sin \varphi^i(t_k) \cos \theta^i(t_k), \\ P_y^i(t_{k+1}) = P_y^i(t_k) + \Delta T v^i(t_k) \sin \varphi^i(t_k) \sin \theta^i(t_k), \\ P_z^i(t_{k+1}) = P_z^i(t_k) + \Delta T v^i(t_k) \cos \varphi^i(t_k). \end{cases}$$

式中: $(P_x^i(t_k), P_y^i(t_k), P_z^i(t_k))$ 和 $(P_x^i(t_{k+1}), P_y^i(t_{k+1}), P_z^i(t_{k+1}))$ 分别表示 AUV _{i} 当前时刻和下一时刻的实时位置, ΔT 为仿真步长.

在多 AUV 系统中个体 AUV 的运动学方程描述为

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

式中: $\mathbf{x}_i(t)=[v_i(t) \quad \theta_i(t) \quad \varphi_i(t)]^T$,表示 t 时刻需要一致性协商的个体 AUV 的状态, $\mathbf{u}_i(t)$ 表示 t 时刻控制输入,为相应维数控制向量.多 AUV 编队控制的目的是:当 $t \geq t_e$ 时, $\|v_i(t) - v_j(t)\| = 0$, $\|\theta_i(t) - \theta_j(t)\| = 0$ 和 $\|\varphi_i(t) - \varphi_j(t)\| = 0$,所以 t_e 时刻之后所有 AUV 取得了一致的运动状态.对于运动学方程(1),文献[7]采用的一致性协议为:

$$\mathbf{u}_i(t) = \sum_{v_j \in N_i} a_{ij}(\mathbf{x}_j(t) - \mathbf{x}_i(t)). \quad (2)$$

对于具有网络时延的多 AUV 系统,文献[7]采用了如下的带有时延的一致性协议:

$$\mathbf{u}_i(t) = \sum_{v_j \in N_i} a_{ij}(\mathbf{x}_j(t - \tau_{ij}) - \mathbf{x}_i(t - \tau_{ij})). \quad (3)$$

式中: N_i 表示个体 i 的邻居个体集; $a_{ij} > 0$ 为有向图 $G=(V,E,A)$ 的邻接矩阵 \mathbf{A} 的邻接权重.水下环境噪声的影响会导致系统的状态变为随机状态,此时系统一致性协议为

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{x}}_i(t_k) = & \sum_{v_j \in N_i} a_{ij}(\mathbf{x}_j(t_k) - \mathbf{x}_i(t_k)) + \\ & b_{i0}(\mathbf{x}_0(t_k) - \mathbf{x}_i(t_k)) + \mathbf{w}_i(t_k). \end{aligned}$$

式中: t_k 为系统采样时刻, $\mathbf{w}_i(t_k)$ 为 t_k 时刻的过程噪声.为了减小环境噪声对多 AUV 编队控制的影响,必须从一系列的噪声测量中,估计出动态系统的状态.

2 基于卡尔曼滤波的一致性协议

本文提出一种 AUV 利用其嵌入的全局滤波器对系统状态进行滤波的编队控制方法.所提出受噪声影响的一致性跟踪协议为:

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{x}}_i(t_k) = & \sum_{v_j \in N_i} a_{ij}(\mathbf{x}_j(t_k) - \mathbf{x}_i(t_k)) + \\ & b_{i0}(\mathbf{x}_0(t_k) - \mathbf{x}_i(t_k)) + \mathbf{w}_i(t_k), \\ \mathbf{z}_i(t_k) = & h_i(t_k)\mathbf{x}_i(t_k) + \mathbf{v}_i(t_k). \end{aligned}$$

式中: $\mathbf{w}_i(t_k)$ 为过程白噪声, $\mathbf{v}_i(t_k)$ 为量测白噪声.

令

$$\begin{aligned} \mathbf{X} &= [\mathbf{x}_1^T \quad \mathbf{x}_2^T \quad \dots \quad \mathbf{x}_7^T]^T, \\ \mathbf{W} &= [\mathbf{w}_1^T \quad \mathbf{w}_2^T \quad \dots \quad \mathbf{w}_7^T]^T, \\ \mathbf{Z} &= [\mathbf{z}_1^T \quad \mathbf{z}_2^T \quad \dots \quad \mathbf{z}_7^T]^T, \\ \mathbf{V} &= [\mathbf{v}_1^T \quad \mathbf{v}_2^T \quad \dots \quad \mathbf{v}_7^T]^T, \end{aligned}$$

则多智能体系统方程可以写成矩阵形式:

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{X}}(t) &= (\mathbf{L}(t) - \mathbf{I})\mathbf{X}(t) + \mathbf{b}_0\mathbf{x}_0(t) + \mathbf{W}(t), \\ \mathbf{Z}(t) &= \mathbf{H}(t)\mathbf{X}(t) + \mathbf{V}(t). \end{aligned} \quad (4)$$

式中:状态 $\mathbf{x}_0(t)$ 为常数向量, $\mathbf{L}(t)$ 为相应维数的时变拉普拉斯矩阵, \mathbf{b}_0 为相应维数的常数矩阵.对于系统方程(4)求其方程的解.则系统方程的解为

$$\mathbf{X}(t) = e^{(\mathbf{L}(t) - \mathbf{I})(t - t_0)} \mathbf{X}(t_0) + \int_{t_0}^t \mathbf{b}_0 \mathbf{x}_0 d\tau + \mathbf{W}(t).$$

对上式进行形式上的离散化,所以

$$\begin{aligned} \mathbf{X}((k+1)\Delta T) &= e^{(\mathbf{L}(k) - \mathbf{I})\Delta T} \mathbf{X}(k\Delta T) + \\ & \int_{k\Delta T}^{(k+1)\Delta T} \mathbf{b}_0 \mathbf{x}_0 d\tau + \mathbf{W}(k\Delta T). \end{aligned}$$

式中: ΔT 为仿真步长,进一步有

$$\mathbf{X}(k+1) = e^{(\mathbf{L}(k) - \mathbf{I})\Delta T} \mathbf{X}(k) + \Delta T \mathbf{b}_0 \mathbf{x}_0 + \mathbf{W}(k),$$

整理得

$$\mathbf{X}(k+1) = \mathbf{A}(k)\mathbf{X}(k) + \mathbf{u}(k) + \mathbf{W}(k),$$

式中: $\mathbf{A}(k) = e^{(\mathbf{L}(k) - \mathbf{I})\Delta T}$, $\mathbf{u}(k) = \Delta T \mathbf{b}_0 \mathbf{x}_0$.

同理,将系统方程(4)第2个公式离散化得

$$\mathbf{Z}(k) = \mathbf{H}(k)\mathbf{X}(k) + \mathbf{V}(k).$$

所以得到离散形式的系统方程为

$$\begin{aligned} \mathbf{X}(k+1) &= \mathbf{A}(k)\mathbf{X}(k) + \mathbf{u}(k) + \mathbf{W}(k), \\ \mathbf{Z}(k) &= \mathbf{H}(k)\mathbf{X}(k) + \mathbf{V}(k). \end{aligned} \quad (5)$$

对于系统方程(5),系统初始时刻的状态定义为 $\mathbf{Z}(0) = \mathbf{X}(0)$, $\hat{\mathbf{X}}(0) = \mathbf{X}(0)$, 对于采样次数 $k=1, 2, \dots, N$, 使用式(6)进行最优递推滤波, 可得系统状态最优估计值.

$$\begin{aligned} \hat{\mathbf{X}}^-(k) &= \mathbf{A}(k)\hat{\mathbf{X}}(k-1) + \mathbf{u}(k-1), \\ \mathbf{P}^-(k) &= \mathbf{A}(k)\mathbf{P}(k-1)\mathbf{A}(k)^T + \mathbf{Q}, \\ \mathbf{K}(k) &= \mathbf{P}^-(k)\mathbf{H}(k)^T(\mathbf{H}(k)\mathbf{P}^-(k)\mathbf{H}(k)^T + \mathbf{R})^{-1}, \\ \hat{\mathbf{X}}(k) &= \hat{\mathbf{X}}^-(k) + \mathbf{K}(k)(\mathbf{Z}(k) - \mathbf{H}(k)\hat{\mathbf{X}}^-(k)), \\ \mathbf{P}(k) &= (\mathbf{I} - \mathbf{K}(k)\mathbf{H}(k))\mathbf{P}^-(k). \end{aligned} \quad (6)$$

式中: $\hat{\mathbf{X}}^-(k)$ 为 k 时刻使用系统状态方程对状态的预测, $\hat{\mathbf{X}}(k-1)$ 为 $k-1$ 时刻状态的最优估计值, $\mathbf{P}^-(k)$ 为 k 时刻对误差协方差的预测, $\mathbf{P}(k-1)$ 为上一时刻计算得到的误差协方差, $\hat{\mathbf{X}}(k)$ 为 k 时刻状态的最优估计值, $\mathbf{P}(k)$ 为 k 时刻更新得到的误差协方差, $\mathbf{K}(k)$ 为 k 时刻滤波器增益.

3 数值仿真

由于多 AUV 编队拓扑为动态拓扑, 所以在 MATLAB 仿真时, 对于每一次采样都重新计算拉普拉斯矩阵 $\mathbf{L}(k)$ 、系统矩阵 $\mathbf{A}(k)$ 和观测矩阵 $\mathbf{H}(k)$. 将相互有通信联系的智能体在拓扑矩阵中相应矩阵元素置为 1, 失去联系的智能体其相应矩阵元素置为 0, 以表示时变矩阵.

设虚拟领航者方程为

$$\mathbf{x}_0(t) = [2(\text{m/s}) \quad 2(\text{rad}) \quad 2(\text{rad})]^T. \quad (7)$$

取输出矩阵 $\mathbf{H} = \mathbf{I}_{7 \times 7}$; \mathbf{W} 、 \mathbf{V} 的协方差分别为 $\mathbf{Q} = 2\mathbf{I}_{7 \times 7}$, $\mathbf{R} = 2\mathbf{I}_{7 \times 7}$. 仿真步长 $\Delta T = 0.1\text{s}$. 数值仿真结果如图 1~3 所示.

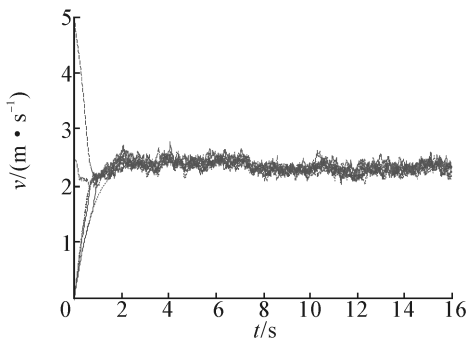


图 1 领航者方程为式(7)时,7 个智能体无滤波时的速度一致性

Fig.1 Consensus on velocity of 7 agents without filtering when the leader equation is Equ.(7)

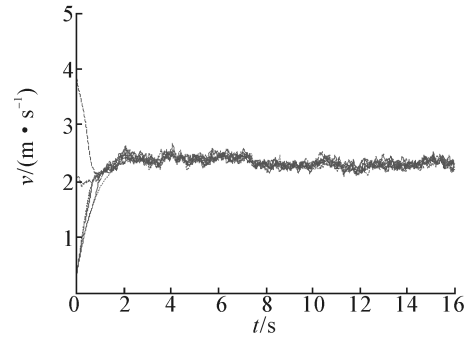
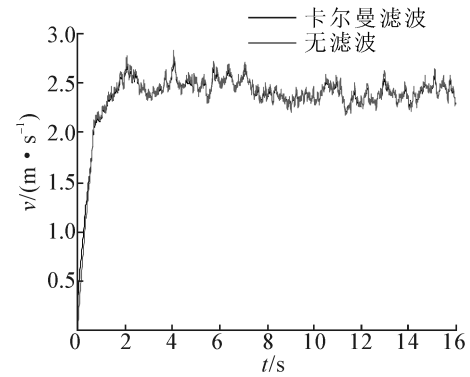
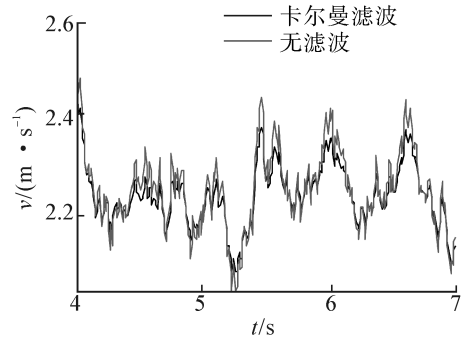


图 2 领航者方程为式(7)时,7 个智能体滤波后的速度一致性

Fig.2 Consensus on velocity of 7 agents with Kalman filter when the leader equation is Equ.(7)



(a) 原图



(b) 局部放大图

图 3 领航者方程为式(7)时,滤波前后智能体 1 的速度对比

Fig.3 Consensus on velocity of agent-1 with filtering Vs without filtering when the leader equation is Equ.(7)

设虚拟领航都方程为

$$\mathbf{x}_0(t) = \sin(\omega t)\mathbf{I}_{3 \times 3}, \quad (8)$$

\mathbf{b}_0 为常数矩阵, $\mathbf{L}(t)$ 为时变拉普拉斯矩阵. 则系统方程的解为

$$\mathbf{X}(t) = e^{(\mathbf{L}(t) - \mathbf{I})(t-t_0)}\mathbf{X}(t_0) + \int_{t_0}^t \mathbf{b}_0\mathbf{x}_0(\tau) d\tau + \mathbf{W}(t).$$

所以

$$\mathbf{X}((k+1)\Delta T) = e^{(L(k)-I)\Delta T} \mathbf{X}(k\Delta T) + \int_{k\Delta T}^{(k+1)\Delta T} \mathbf{b}_0 \mathbf{x}_0(t) d\tau + \mathbf{W}(k\Delta T).$$

式中: ΔT 为采样周期,进一步有

$$\mathbf{X}(k+1) = e^{(L(k)-I)\Delta T} \mathbf{X}(k) -$$

$$\mathbf{b}_0(\cos(\omega(k+1)) - \cos(\omega k))/\omega + \mathbf{W}(k).$$

整理得

$$\mathbf{X}(k+1) = \mathbf{A}(k)\mathbf{X}(k) + \mathbf{u}(k) + \mathbf{W}(k).$$

式中:

$$\mathbf{A}(k) = e^{(L(k)-I)\Delta T},$$

$$\mathbf{u}(k) = -\mathbf{b}_0(\cos(\omega(k+1)) - \cos(\omega k))/\omega.$$

取输出矩阵 $\mathbf{H} = \mathbf{I}_{7 \times 7}$; \mathbf{W} 、 \mathbf{V} 的协方差分别为 $\mathbf{Q} = 2\mathbf{I}_{7 \times 7}$, $\mathbf{R} = 2\mathbf{I}_{7 \times 7}$. 采样间隔 $\Delta T = 0.1$ s, $\omega = 2$ rad \cdot s $^{-1}$. 数值仿真结果如图 4~6 所示. 从图中可以看出通过递推最优滤波的方式,能够一定程度地消减环境噪声对系统状态的影响,从而提高了系统的最终一致性状态的精度.

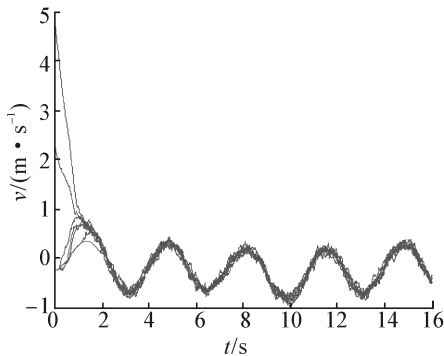


图4 领航者方程为式(8)时,7个智能体无滤波时的速度一致性

Fig. 4 Consensus on velocity of 7 agents without filtering when the leader equation is Equ.(8)

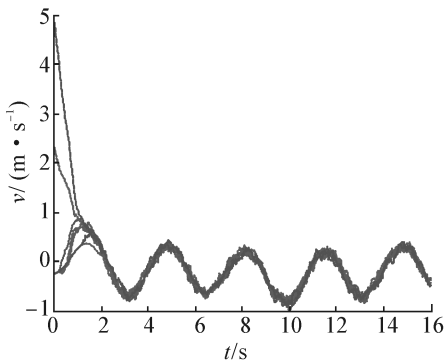
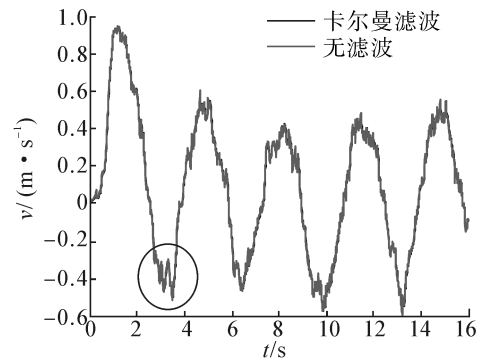
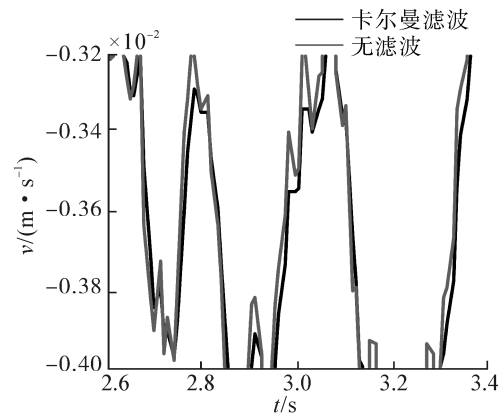


图5 领航者方程为式(8)时,7个智能体滤波后的速度一致性

Fig.5 Consensus on velocity of 7 agents with Kalman Filter when the leader equation is Equ.(8)



(a) 原图



(b) 局部放大图

图6 领航者方程为式(8)时,智能体1的速度滤波前后对比

Fig.6 Consensus on velocity of agent-1 with filtering Vs without filtering when the leader equation is Equ.(8)

4 结束语

研究了空间大尺度多 AUV 系统编队控制问题. 对于空间相距较远的多 AUV 系统,从大尺度上研究其编队控制问题.将多 AUV 系统建模为多智能体系统,研究其三维空间编队控制问题.AUV 利用其嵌入的全局滤波器对系统状态进行滤波的编队控制,利用卡尔曼滤波器进行系统滤波从而得到每个 AUV 自身运动状态的最优估计值,最后仿真验证了所给出的控制策略的有效性.

参考文献:

- [1] FIORELLI E. Multi-AUV control and adaptive sampling in Monterey Bay [J]. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 2006, 31(4): 935-948.
- [2] YU S C, 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 Engi-

neering, 2004, 14(4): 264-272.

- [3] DEREK P, ZHANG F M, LEONARD N E. Cooperative control for ocean sampling: the glider coordinated control system[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2008, 16(4): 735-744.
- [4] XIANG X B. Coordinated control for multi-AUV systems based on hybrid automata[C]// IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics. [S.l.], 2007: 2121-2126.
- [5] DO K D. Formation tracking control of unicycle-type mobile robots with limited sensing ranges[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2008, 16(3): 527-538.
- [6] YANG E F, GU D B. Nonlinear formation-keeping and mooring control of multiple autonomous underwater vehicles [J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2007, 2(2): 164-178.
- [7] JADBABAIE A, LIN J, MORSE A S. Coordination of groups of mobile autonomous agents using nearest neighbor rules[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2003, 48(6): 988-1001.

作者简介:



袁健,男,1980年生,副研究员,博士,主要研究方向为自主水下航行器的编队控制.参与国家自然科学基金、国际科技合作项目、山东省自然科学基金等项目多项.发表学术论文20余篇.



周忠海,男,1975年生,研究员,博士,主要研究方向为海洋环境监测技术.先后承担了国家“863”计划、国际科技合作项目、海洋公益性项目和青岛市对外合作项目.现主持国家科技部国际科技合作项目1项.发表学术论文50余篇.



金光虎,男,1979年生,副研究员,博士,主要研究方向为海洋传感技术.参与多项国际科技合作项目.发表学术论文20余篇,获得专利10余项.

2014 IEEE 机电一体化与自动化国际会议 The 2014 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation (IEEE ICMA 2014)

The 2014 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation (ICMA 2014) will take place in Chengdu, Sichuan, China from August 3 to August 6, 2014. Tianjin is a tribute to China's proud history. Nestled in Tianjin, a time-honored city famous for its history, culture and landscapes.

As the host city of ICMA 2014, Tianjin not only provides the attendees with a great venue for this event, but also an unparalleled experience in Chinese history and culture. You are cordially invited to join us at IEEE ICMA 2014 in Tianjin to live this unique experience. The objective of ICMA 2014 is to provide a forum for researchers, educators, engineers, and government officials involved in the general areas of mechatronics, robotics, automation and sensors to disseminate their latest research results and exchange views on the future research directions of these fields. The topics of interest include, but not limited to the following:

- Intelligent mechatronics, robotics, biomimetics, automation and control systems
- opto-electronic elements and Materials, laser technology and laser processing
- Elements, structures, mechanisms, and applications of micro and nano systems
- Teleoperation, telerobotics, haptics, and teleoperated semi-autonomous systems
- Sensor design, multi-sensor data fusion algorithms and wireless sensor networks
- Biomedical and rehabilitation engineering, prosthetics and artificial organs
- Control system modeling and simulation techniques and methodologies
- AI, intelligent control, neuro-control, fuzzy control and their applications
- Industrial automation, process control, manufacturing process and automation

Website: <http://2014.ieee-icma.org/>