

# 基于虚拟 AUV 的协同定位最优队形研究

张立川

(西北工业大学航海学院, 西安 710072)

- 5 **摘要:** 多水下无人航行器 (Multiple Autonomous Underwater Vehicles, MAUVs) 协同导航定位技术是水下协同作业的关键技术。针对主从式结构的多 AUV 协同导航算法, 提出了虚拟 AUV 概念, 探讨了编队结构对协同导航定位精度的影响。讨论了编队队形的优化准则, 建立了协同导航最优编队的代价函数; 研究了主从式多 AUV 协同导航模式下最优编队问题, 分两种情况对该问题进行了分析, 结合实际工程应用, 推导出优化的编队队形。
- 10 **关键词:** 协同导航; 虚拟结构; 最优编队
- 中图分类号:** TP24

## Optimal formation of multiple AUVs cooperative localization based on virtual structure

ZHANG Lichuan

(School of Marine Engineering, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072)

- 15 **Abstract:** Cooperative localization of multiple autonomous underwater vehicles (MAUVs) is key technology for complex underwater missions. To solve the accuracy cooperative localization problem of Leader-Follower AUVs, an optimal formation of multiple AUVs based on virtual structure is proposed. The principle of virtual AUV is proposed and used to evaluate the effect of formation on the cooperative localization. Also, the cost function of optimal formation is presented. And the optimal formations are discussed in two different cases.
- 20 **Keywords:** Cooperative Localization; Virtual Structure; Optimal Formation

## 0 引言

- 25 在多智能体的定位导航过程中, 智能体相对于路标的位置分布直接影响到导航定位精度。在无人机方面, 李朝旭<sup>[1,2]</sup>针对多个无人机的协同运动问题, 研究了跟随-领航模式下多无人机协同运动的虚拟队形制导控制方法, 将预期队形在线规划为虚拟队形, 并设计 Lyapunov 控制器对无人机进行制导控制; 宋敏<sup>[3]</sup>针对使用多无人机编队进行协同侦察任务的协同控制问题, 基于编队通信拓扑的分布性, 研究了以虚拟长机为编队航迹引导的分布式编队控制方法, 减小了编队误差, 实现了航迹的高精度跟踪。在陆地机器人方面, Hidaka Y S<sup>[4]</sup>研究了队形对机器人定位精度的影响, 提出了代价函数, 并设计了机器人最优编队的经验规则; 王玲<sup>[5]</sup>利用信息熵的方法对观测量的选择及机器人分布式机制进行了研究, 针对陆地移动机器人合作定位中的最佳运动轨迹进行了分析。

- 35 在机器人合作定位中, 当只有一个路径的情况下, 一个观测量不能起到定位的作用, 不存在最优的位置分布; 当有两个路标的情况下, 机器人位于以两个路标连线为直径的圆上时, 定位精度可达到最优; 当三个路标的情况下, 机器人位于路标组成三角形的中心位置或三角形的外接圆上时, 定位精度最优。

- 40 多 AUV 协同定位的原理与陆地移动机器人类似, 陆地移动机器人利用多个已知路标, 基于相对位置关系进行合作定位, 主从式多 AUV 协同定位的实质是利用一个已知路标在不同时刻的位置, 基于几何关系进行协同定位, 两者之间的原理是相同的。国外方面, Bahr A<sup>[6]</sup>

**基金项目:** 高等学校博士学科点专项科研基金资助课题(20106102120057); 国家自然科学基金青年基金项目(51109179); 西北工业大学基础研究基金(JC201228); 西北工业大学翱翔之星资助计划。

**作者简介:** 张立川, (1982-), 男, 副教授, 博士, 主要研究方向: 水下导航与控制技术。E-mail: zlc@nwpu.edu.cn

等人研究了基于水声 modem 的多 AUV 协同导航, 利用主 AUV 的高精度的导航设备, 通过一定的广播通信, 使群体中的其他 AUV 可以同步获得更高的导航定位精度。Rui Gao<sup>[7]</sup>、Pentzer J<sup>[8]</sup>、Fallon M. F.<sup>[9,10]</sup>等人研究都基于多 AUV 间的水下距离测量, 实现群体 AUV 的协同导航。Eustice<sup>[11,12]</sup>等人对多 AUV 协同导航进行了实验; 欧盟的 GREX 项目<sup>[13,14]</sup>、美国 CADRE 系统<sup>[15]</sup>等已经将多 AUV 协同导航应用于实际工程。

国内方面, 哈尔滨工程大学<sup>[16,17]</sup>在多 AUV; 中科院沈阳自动化所许真珍<sup>[18,19]</sup>等人; 西北工业大学姚尧<sup>[20,21]</sup>针对存在时间延迟情况, 提出了多 AUV 的最优量测策略, 最小化 AUV 之间的通信与距离测量, 张立川<sup>[22-24]</sup>在测量水声传播延迟的条件下, 研究了单领航者、双领航者两种模式下多 AUV 协同导航算法。

在多 AUV 协同导航定位中, 利用到 AUV 之间相对位置观测量, AUV 的相对位置关系必然对协同导航定位精度产生影响。本文针对主从式 (Leader-Follower) 多 AUV 协同定位, 提出了虚拟 AUV 概念, 建立了协同定位最优编队的代价函数; 分两种情况对该问题进行了分析, 结合实际工程应用, 推导出优化的编队队形, 探讨了编队结构对协同定位精度的影响。

## 1 主从式多 AUV 协同定位机理

在多 AUV 协同定位过程中, 主 AUV、从 AUV 携带不同精度的导航传感器, 利用水声通信装置建立主 AUV 与从 AUV 之间的联系, 达到协同定位的目的。主 AUV 装备高精度惯性导航设备、多普勒测速仪、差分 GPS、水声通信设备等, 其导航系统以捷联惯导设备为主, 初始位置通过差分 GPS 获得, 以多普勒测速仪测量的绝对速度作为捷联惯导外部输入, 进一步提高精度。从 AUV 装备低精度航位推算导航设备、GPS、水声通信设备等。主 AUV、从 AUV 在执行任务前, 均通过 GPS 进行时间校正, 以保证时间同步。

在协同定位过程中, 如图 1, 主 AUV 按照预先约定的时间间隔向外发射固定频率的声信号脉冲, 间隔一段时间后, 通过水声通信装置广播主 AUV 自身位置。从 AUV 接收到声信号脉冲和主 AUV 位置后, 由声信号脉冲解算出相对距离, 再根据主 AUV 位置来完成协同定位。协同定位的关键是相对距离的确定。文献[22, 23]详细给出了主从式多 AUV 协同定位的算法和仿真算例。

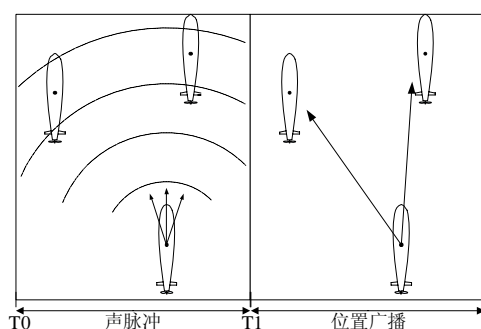


图 1 协同定位原理图

Fig. 1 Principle of Cooperative localization

## 2 最优编队计算

### 2.1 虚拟 AUV

主从式多 AUV 协同定位算法中, 是将从 AUV 的轨迹圆进行平移, 从而求解方程, 其实质是引入虚拟 AUV, 如下图所示, 将  $t_k$  时刻主 AUV 与从 AUV 的位置关系进行平移, 在

75  $t_{k+1}$  时刻, 虚拟 AUV、主 AUV 与从 AUV 的距离关系分别为  $r_k$  和  $r_{k+1}$ , 这两个距离关系就是算法的量测信息。

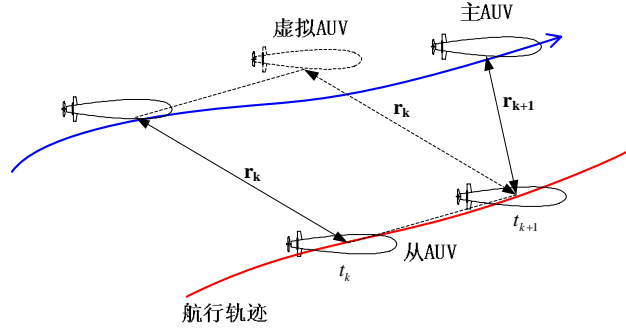


图 2 虚拟 AUV 示意图  
Fig.2 Schematic of virtual AUV

80 设主从式多 AUV 协同定位中, 从 AUV 的位置预测估计表示为

$$\hat{X}_{k+1/k}^M = \begin{bmatrix} \hat{x}_{k+1/k}^M \\ \hat{y}_{k+1/k}^M \end{bmatrix} \quad (1)$$

预测协方差矩阵为

$$P_{k+1/k} = E[(\hat{X}_{k+1/k}^M - X_{k+1/k}^M)(\hat{X}_{k+1/k}^M - X_{k+1/k}^M)^T] \quad (2)$$

85 在文中, 量测为距离的平方, 在此利用距离量测

$$Z_k = h(X_k^M) + w_k = \begin{bmatrix} r_k \\ r_{k+1} \end{bmatrix} + w_k \quad (3)$$

上式中,

$$r_k = \sqrt{(x_{k+1}^{S'} - x_{k+1}^M)^2 + (y_{k+1}^{S'} - y_{k+1}^M)^2} \quad (4)$$

$$r_{k+1} = \sqrt{(x_{k+1}^S - x_{k+1}^M)^2 + (y_{k+1}^S - y_{k+1}^M)^2} \quad (5)$$

90 其中,  $(x_{k+1}^{S'}, y_{k+1}^{S'})$  是虚拟 AUV 的位置,  $(x_{k+1}^S, y_{k+1}^S)$  是主 AUV 在  $t_{k+1}$  时刻的位置,  $(x_{k+1}^M, y_{k+1}^M)$  是从 AUV 的位置。  $w_k$  为零均值高斯白噪声, 其方差矩阵为

$$R = E[w_k w_k^T] = \sigma_R^2 I \quad (6)$$

量测方程的 Jacobian 矩阵为

$$H_{k+1} = \frac{\partial h}{\partial X_{k+1}} \bigg|_{\hat{X}_{k+1,k}} = \begin{bmatrix} \frac{\hat{x}_{k+1}^M - x_{k+1}^{S'}}{r_k} & \frac{\hat{y}_{k+1}^M - \hat{y}_{k+1}^{S'}}{r_k} \\ \frac{\hat{x}_{k+1}^M - x_{k+1}^S}{r_{k+1}} & \frac{\hat{y}_{k+1}^M - \hat{y}_{k+1}^S}{r_{k+1}} \end{bmatrix} \quad (7)$$

## 95 2.2 代价函数

在分析基于卡尔曼滤波的定位算法精度时, 通常采用协方差矩阵  $P$  来进行衡量, 它描

述了系统的定位误差，也即定位的不确定性。在线性定常系统<sup>[9]</sup>中，系统的状态方程和观测方程是定常的，其  $F$ 、 $G$  和  $H$  为常值矩阵，并且噪声方差  $Q$  和  $R$  也为常值矩阵，因此，协方差矩阵  $P$  不受系统状态及编队队形的影响；而对于多 AUV 协同定位算法的非线性系统， $F_x$ 、 $F_u$  和  $H_k$  均与当前状态有关，因此，协方差矩阵  $P$  与系统状态及编队队形有关。多 AUV 在水下协同航行时，其相对位置关系直接关系到协同定位的精确性，对于一群 AUV，在给定初始位置及最终目标点的条件下，必定存在一特定的编队队形，以保证其达到最优协同定位精度，也即最优编队队形。

在卡尔曼滤波算法中，通常使用误差椭圆的面积来表示不确定性，即

$$S = \pi \sqrt{\det(P)} \quad (8)$$

式(8)即是代价函数， $P$  为滤波算法中的协方差矩阵，当其取值达到最小值时，也就得到了最优编队队形，保证了在这一条件，AUV 协同定位精度优于其它的编队队形。

### 2.3 最优编队准则

利用式(8)作为最优编队的准则，根据  $P_{k+1/k+1}$  的正定性，使式(8)取得最小值，也即  $\det(P_{k+1/k+1}^{-1})$  取得最大值，根据卡尔曼滤波方程， $P_{k+1/k+1}^{-1}$  被称为信息矩阵，采用信息矩阵表示的滤波方程称为信息滤波方程，具体表示为

$$P_{k+1/k+1}^{-1} = P_{k+1/k}^{-1} + H_{k+1}^T R^{-1} H_{k+1} \quad (9)$$

上式中，由于没有 AUV 位置的先验分布信息， $P_{k+1/k} \rightarrow \infty$ ，即  $P_{k+1/k}^{-1} \rightarrow 0$ ，又由式(6)，得

$$R^{-1} = \frac{1}{\sigma_R^2} I \quad (10)$$

因此，式(9)的极值问题，转化为如下极值

$$\max P_{k+1/k+1}^{-1} \Leftrightarrow \max \det(H_{k+1}^T H_{k+1}) \quad (11)$$

文献<sup>[5]</sup>对式(11)进行了三角变换推导，这里利用其结果

$$\max \det(H_{k+1}^T H_{k+1}) = \max \frac{1}{2} (\sin^2(\beta_{S'} - \beta_S)) \quad (12)$$

上式中， $\beta_{S'}$ 、 $\beta_S$  分别表示在水平投影平面内，虚拟 AUV、主 AUV 与从 AUV 连线与其前进方向的夹角。

当  $\beta_{S'} - \beta_S = \frac{\pi}{2} + k\pi, (k = 0, 1, 2, \dots)$  时， $\max \det(H_{k+1}^T H_{k+1})$  取极值，也即定位精度可达最优。此时，虚拟 AUV、主 AUV、从 AUV 三者在水平面投影的位置关系如下图所示。

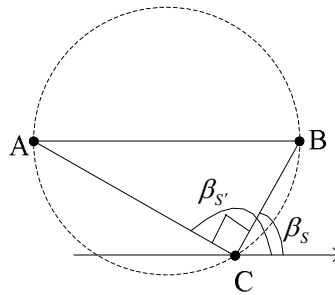


图 3 水平投影位置关系示意图  
Fig.3 Relationship of Horizontal position

上图中,A、B 分别表示虚拟 AUV 和主 AUV,C 表示从 AUV,取得极值时  $\beta_{s'} - \beta_s = \frac{\pi}{2}$ ,

即得  $\angle ACB = 90^\circ$ , 也即  $\triangle ABC$  为直角三角形, 点 C 位于以线段 AB 为直径的圆上。因此, 当从 AUV 在水平面的投影位于以虚拟 AUV 和主 AUV 连线为直径的圆上(圆也在水平面内)时, 协同定位精度最优。

以上分析了从 AUV 与虚拟 AUV、主 AUV 的位置关系, 而在实际航行过程中, 虚拟 AUV 是不存在的, 其轨迹与主 AUV 有必然联系, 无法单独定义其轨迹, 因此, 需再分析主 AUV 与从 AUV 之间的位置关系。

### 3 实例分析

按以下实例情况分别分析:

#### (1) 同向同速航行

当主 AUV 与从 AUV 同向同速航行时, 从  $t_k$  到  $t_{k+1}$  时刻, 虚拟 AUV 将与主 AUV 重合, 也就是对于从 AUV 来说, 只有一个外部量测数据, 从而无法根据协同定位算法求得从 AUV 位置信息。此种情况下, 无法获得协同定位精度最优。

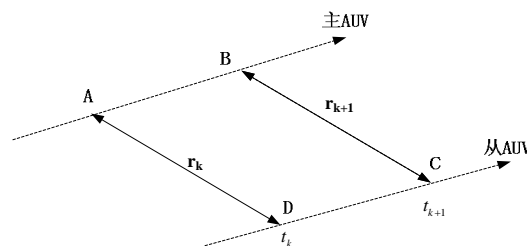


图 4 主从 AUV 同向同速情况  
Fig.4 Case of same speed

#### (2) 航向相同, 速度不同

主 AUV 和从 AUV 航向相同, 速度不同, 在同一时间段内, 主 AUV 从 A 点航行至 B 点, 从 AUV 从 D 点航行至 C 点, AB 距离大于 CD 距离, 主 AUV 速度大于从 AUV 速度; 而图 6 中, AB 距离小于 CD 距离, 主 AUV 速度小于从 AUV 速度。当主从 AUV 航向相同速度不同时, 虚拟 AUV (B' 点) 也在主 AUV 航向方向上。

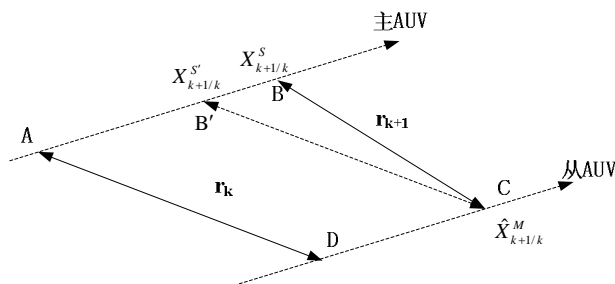


图 5 主 AUV 速度大于从 AUV 速度情况  
Fig.5 Case of Leader speed greater than Follower

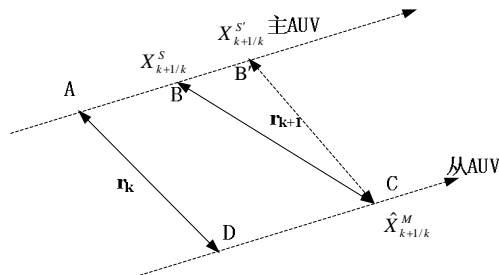


图 6 主 AUV 速度小于从 AUV 速度情况  
Fig.6 Case of Leader speed smaller than Follower

前文分析可知，当虚拟 AUV、主 AUV、从 AUV 三者构成直角三角形，且虚拟 AUV 与主 AUV 连线为直径，如何保证图 5 和图 6 所示的情况满足这一条件呢。分析如下：

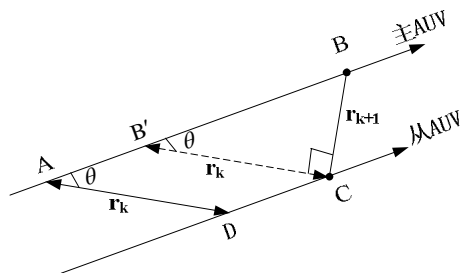


图 7 主 AUV 速度大于从 AUV 速度情况示意图  
Fig.7 Case of Leader speed greater than Follower

上图中，在  $t_k$  时刻，主 AUV、从 AUV 位置分别在 A 点、D 点，而此时，A 点和 D 点位置已知，两 AUV 航向角也知，则图中的角  $\theta$  也可以求得，要使  $\angle B'CB$  为直角，则必须满足三角定理。

$$BB' = \frac{r_k}{\cos \theta} \quad (13)$$

设主 AUV 速度为  $v_s$ ，从 AUV 速度为  $v_m$ ，时间间隔为  $\Delta t$ ，则  $CD = v_m \cdot \Delta t$ ；虚拟 AUV 所在的  $B'$  是由  $AD$  平移而来， $CD = AB'$ 。则有

$$\begin{aligned} AB &= AB' + BB' \\ \Leftrightarrow v_s \cdot \Delta t &= v_m \cdot \Delta t + \frac{r_k}{\cos \theta} \end{aligned} \quad (14)$$

由上式可得主 AUV 与从 AUV 速度之间的关系。

$$v_s = v_m + \frac{r_k}{\Delta t \cdot \cos \theta} \quad (15)$$

可以看出,在 $t_k$ 时刻主 AUV 与从 AUV 之间建立联系后,确定一系列参数信息,主 AUV 根据这些参数信息,优化其速度,即可满足最优位置估计精度所需的条件,从而保证从 AUV 的协同定位精度。但若长时间航行后,主 AUV 与从 AUV 之间距离将越来越大,最终将无法建立联系,获得距离量测数据,因此,需考虑若主 AUV 速度小于从 AUV 速度的情况,如下图所示。

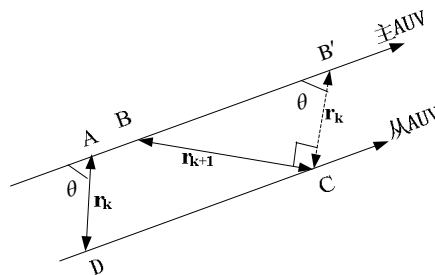


图 8 主 AUV 速度小于从 AUV 速度情况示意图  
Fig. 8 Case of Leader speed smaller than Follower

由图中关系可得

$$\begin{aligned} AB' &= AB + BB' \\ \Leftrightarrow v_m \cdot \Delta t &= v_s \cdot \Delta t + \frac{r_k}{\cos \theta} \end{aligned} \quad (16)$$

则主 AUV 与从 AUV 速度之间的关系

$$v_s = v_m - \frac{r_k}{\Delta t \cdot \cos \theta} \quad (17)$$

所以,当主 AUV 速度小于从 AUV 速度时,满足上式条件,即可保证从 AUV 协同定位的精度最优,从而实现最优编队队形。

由以上分析,当主从 AUV 航向角相同,可以在两种情况下,实现协同定位的精度最优,具体实际航行过程中,主 AUV 的速度可以根据需要进行变速,时而速度大于从 AUV,时而速度小于从 AUV,以避免两者之间距离过大,无法实现距离测量和信息通讯。

(3) 航向不同,速度也不同

主从式 AUV 协同定位的第三种情况是:主 AUV 与从 AUV 航向角不同,速度也不同。这种情况在实际使用中很少出现,因为一旦出现这种情况,经过很短时间主 AUV 与从 AUV 将失去联系,无法进行协同定位。因此,此情况本文不作过多分析。

## 4 结论

提出了虚拟 AUV 概念,建立了协同定位最优编队的代价函数,推导出优化的编队队形。结合实际工程应用,分情况探讨了编队结构对协同定位精度的影响,当主 AUV 与从 AUV 速度不同,航向相同,在特定位置关系下存在最优编队;当两者速度相同时,协同定位精度并不是最优的。



## 200 [参考文献] (References)

- [1] 李朝旭, 刘忠, 尹晖. 多无人机协同运动的虚拟队形制导控制[J]. 系统工程与电子技术. 2012, 34(6): 1220-1224.
- [2] 李朝旭, 刘忠, 尹晖, 等. 一种多 UAV 虚拟队形制导协同运动控制方法[J]. 火力与指挥控制. 2012, 37(11): 24-28.
- 205 [3] 宋敏, 魏瑞轩, 胡明朗. 基于虚拟长机的无人机侦察编队控制方法[J]. 系统工程与电子技术. 2010, 32(11): 2412-2415.
- [4] Hidaka Y S, Mourikis A I, Roumeliotis S I. Optimal formations for cooperative localization of mobile robots[C]. IEEE, 2005.
- [5] 王玲. 未知环境中基于相对观测量的多机器人合作定位研究[D]. 长沙:国防科学技术大学, 2006.
- 210 [6] Bahr A, Leonard J J, Martinoli A. Dynamic positioning of beacon vehicles for cooperative underwater navigation[C]. Intelligent Robots and Systems (IROS), 2012 IEEE/RSJ International Conference on 2012.
- [7] Rui G, Chitre M. Cooperative positioning using range-only measurements between two AUVs[C]. IEEE, OCEANS 2010 IEEE-Sydney, 2010.
- [8] Pentzer J, Crosbie B, Bean T, et al. Measurement of magnetic field using collaborative AUVs[C]. IEEE, OCEANS 2010 IEEE-Sydney, 2010.
- 215 [9] Fallon M F, Papadopoulos G, Leonard J J, et al. Cooperative AUV navigation using a single maneuvering surface craft[J]. The International Journal of Robotics Research. 2010, 29(12): 1461-1474.
- [10] Fallon M F, Papadopoulos G, Leonard J J. A measurement distribution framework for cooperative navigation using multiple AUVs[C]. IEEE, Robotics and Automation (ICRA), 2010 IEEE International Conference on, 2010.
- 220 [11] Webster S E, Eustice R M, Singh H, et al. Advances in single-beacon one-way-travel-time acoustic navigation for underwater vehicles[J]. The International Journal of Robotics Research. 2012, 31(8): 935-950.
- [12] Eustice R M, Whitcomb L L, Singh H, et al. Experimental results in synchronous-clock one-way-travel-time acoustic navigation for autonomous underwater vehicles[C]. Proceedings of the 2007 IEEE International Conference on Robotics and Automation, Vols 1-10. 2007: 4257-4264.
- 225 [13] Engel R, Kalwa J. Relative positioning of multiple underwater vehicles in the GREX project[C]. IEEE, OCEANS 2009-EUROPE, 2009.
- [14] Brignone L, Alves J, Opderbecke J. GREX sea trials: first experiences in multiple underwater vehicle coordination based on acoustic communication[C]. IEEE, OCEANS 2009-EUROPE, 2009.
- [15] Willcox S, Goldberg D, Vaganay J, et al. Multi-vehicle cooperative navigation and autonomy with the bluefin CADRE system[C]. IEEE, Proceedings of the International Federation of Automatic Control Conference (IFAC-06), 2006.
- 230 [16] 边信黔, 牟春晖, 严浙平. 多 UUV 沿多条给定路径运动的协调编队控制[J]. 哈尔滨工业大学学报. 2013(01): 106-111.
- [17] 牟春晖, 边信黔, 王宏健, 等. 具有通信约束的多 UUV 协调路径跟踪控制[J]. 鱼雷技术. 2011(03): 195-200.
- 235 [18] 许真珍, 封锡盛. 多 UUV 协作系统的研究现状与发展[J]. 机器人. 2007(02): 186-192.
- [19] 许真珍, 李一平, 封锡盛. 一个面向异构多 UUV 协作任务的分层式控制系统[J]. 机器人. 2008(02): 155-159.
- [20] 姚尧, 徐德民, 张立川, 等. 通信延迟下的多 UUV 协同定位--基于航迹预测的实时更新算法[J]. 机器人. 2011, 33(02): 161-168
- 240 [21] Yao Y, Xu D, Yan W, et al. An optimal measure choosing strategy to AUVs cooperative localization[C]. IEEE, 4th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications, 2009.
- [22] 张立川, 徐德民, 刘明雍, 等. 基于移动长基线的多 AUV 协同导航[J]. 机器人. 2009, 31(006): 581-585.
- [23] 张立川, 刘明雍, 徐德民, 等. 基于水声传播延迟的主从式多无人水下航行器协同导航定位研究[J]. 兵工学报. 2009(012): 1674-1678.
- 245 [24] 张立川, 徐德民, 刘明雍. 基于双水听器的多自主水下航行器协同导航方法[J]. 系统工程与电子技术. 2011(07): 1603-1606