

doi: 10.3969/j.issn.1006-1576.2011.09.017

基于盲区概念减少通信量的多 AUV 编队控制

周添^{1,2}, 康凤举^{1,2}

(1. 西北工业大学航海学院, 西安 710072; 2. 西北工业大学水下信息处理和制国家实验室, 西安 710072)

摘要: 针对在水下复杂环境中编队控制多 AUV 协作的问题, 设计一种使用人工势场和虚拟领航者并引入盲区设计的多 AUV 分布式协作控制方法。介绍一种用于 AUV 集群在无障条件下形成期望编队的反馈控制规律, 详细分析了基于虚拟领航者和盲区概念以减少通信量的控制规则, 建立了 AUV 编队的数学模型, 通过反馈控制完成 AUV 集群的预定编队, 在无障环境下达成一种能减少通信量的 AUV 编队的协调与控制。仿真实验结果验证了该编队控制律的有效性。

关键词: 多 AUV; 编队控制; 盲区; 减少通信

中图分类号: TP272 **文献标志码:** A

Formation Control of Multi-AUV Based on Blind Area Conception for Reduced Communications

Zhou Tian^{1,2}, Kang Fengju^{1,2}

(1. College of Marin, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China;

2. National Technology Key Laboratory for Underwater Information Processing & Control, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

Abstract: For implementing the cooperative formation control of multiple autonomous underwater vehicles (AUVs) in complex underwater environments, designed a distributed control law based on artificial potential field and virtual leaders with blind area. A feedback control law is given for pre-specified formation of AUVs in an obstacle-free environment, the formation control law based on virtual leaders with blind area for reducing communication requirements was studied, and a mathematic model of the formation control for AUVs was established. The feedback control law for pre-specified formation can achieve flocking for a group of AUVs in an obstacle-free environment and lead to reduced communication requirements. The efficiency of the proposed control law was validated by simulation experiment.

Keywords: AUVs; formation control; blind area; reduced communications

0 引言

自主水下航行器 (autonomous underwater vehicle, AUV)^[1-4]在完成水下任务方面发挥了巨大作用。但单个 AUV 的工作能力有限, 往往不能完成一些复杂的任务, 于是人们希望通过多个 AUV 的协作来完成一些单个 AUV 不能够完成的工作, 并增加其安全性以及整个系统的鲁棒性^[5]。编队控制是多 AUV 协作的一个典型性问题, 也是研究其他协作问题的基础。编队控制大致有主从式 (leader-follower), 基于行为 (behavior-based) 的编队控制, 基于虚拟结构 (virtual structure) 方法以及基于人工势场法 (artificial potential field) 的编队控制方法等^[6], 这几种方法各有利弊。

国外对势场法进行编队控制进行了很多研究。人工势场法首先由 Khatib^[7]提出, 其基本思想是借鉴物理方面的概念, 环境中的障碍物对机器人产生

斥力, 目标点对机器人产生吸引力, 机器人在合力的驱动下运动; 文献[8]引入了“social potential”的概念进行队形控制; 文献[9]将环境的信息如邻居、障碍、威胁和目标等编码为一个势场函数, 分析了队形的稳定即均衡, 并仿真实现了利用多个机器人覆盖某一目标区域的任务; 文献[10]提出了一种通用的势函数, 通过方便地选择两组参数的值来生成唯一有效的势函数, 不必为不同的队形设计不同的势函数。此外还可综合避障和目标跟踪的行为; 文献[11]提出了一种使用人工势场和虚拟领航者的多机器人的分布式协作控制方法, 并进行了稳定性分析; 在文献[12]中, 采用了基于人工势场的控制器, 使机器人达到所期望的队形, 但是它们会更改它们的运动以满足的一定的约束条件 (比如说通信或摄像机等传感器的有效距离), 这样会使系统有更强的鲁棒性。其优点是计算简单, 便于实现实时控

收稿日期: 2011-05-24; 修回日期: 2011-06-15

基金项目: 水下信息与制重点实验室基金资助 (9140C2305041001)

作者简介: 周添 (1981—), 男, 湖南人, 硕士, 从事水下武器系统技术, 制导、控制与仿真, 计算机应用及分布交互仿真与虚拟技术研究。

制；缺点是存在局部极值点，势场函数的设计比较困难。

通常复杂水下环境对水下通讯带宽有所限制，但笔者在模型中将通信链接表示为相邻 AUV 之间由信息驱动的操控力，因此减少通信量也能减少 AUV 之间的激励信号。减小 AUV 之间通信量的一种简易方法是使用一些控制规则来减少 AUV 自身发送信息包的数量。因此，笔者主要讨论基于一种基于人工势场和虚拟领航者以减小通信量的编队控制方法。

1 问题描述

人工势场法队形控制的原则是：使用人造虚拟势场，在一定范围内吸引远处的邻居并排斥离得太近的邻居，通过“虚拟领航者”调整队形或控制队形的运动^[13-15]。为达到无障碍物环境下的多 AUV 队形控制，笔者提出一种基于人工势场和虚拟领航者的多 AUV 的分布式协作控制方法。此反馈控制方法允许单个 AUV 在某种情况下切断它与某个邻近 AUV 的通信联系以避免 AUV 间的碰撞和减小激励信号。笔者提出每个 AUV 进入盲区(blind areas)的概念，是指位于盲区中的 AUV 切断与邻近 AUV 的通信联系。每个在自己盲区的 AUV 只受它自己的虚拟领航者的影响，就当其他邻近的 AUV 并不存在，不与其他 AUV 通信，而邻近的不在自己盲区内的 AUV 就要与盲区中的 AUV 通信，主动避让。当所有的 AUV 都在自己盲区区内时就不需要通信，从而达到减少通信量的目的。

考虑由 N 个 AUV 构成的多 AUV 系统在二维的欧氏空间无障碍条件下的运动，每个 AUV 被视作一个质点，那么每个 AUV 可以由下面动力学模型描述：

$$u_i = \dot{r}_i \tag{1}$$

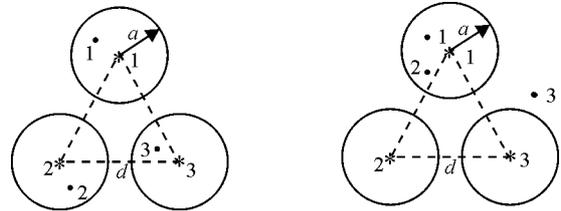
$$m_i \dot{v}_i = u_i - k_i v_i, \quad i = 1, \dots, N \tag{2}$$

式中： $r_i \in R^2$ ，代表第 i 个 AUV 的位置向量； $v_i \in R^2$ ，代表个第 i 个 AUV 的速度矢量； $u_i \in R^2$ ，代表作用在第 i 个 AUV 上面的控制量输入； $k_i > 0$ ，是速度衰减增益，而 $-k_i v_i$ 是速度阻尼项，类似于 AUV 在水中运动所受到的阻力。

2 编队控制规律设计

基于虚拟领航者和人工势场法(直接给出了虚拟

引力和斥力，并未通过人工势场求虚拟力，但也应属于势场法的范畴)来设计控制规则，并给每个 AUV 引入盲区(blind area)的概念。以 3 个 AUV 形成三角形编队为例进行设计，如图 1。



(a) 3AUV 各自在其盲区 (b) 只有 AUV1 在其盲区

图 1 三 AUV 编队及其盲区示意图

它的控制律由式 (3) 给出：

$$u_i = \omega(t) f(\|r_{id} - r_i\|) \frac{r_{id} - r_i}{\|r_{id} - r_i\|} + (1 - \omega(t)) \sum_{j \in N_i(t)} g(\|r_j - r_i\|) \frac{r_j - r_i}{\|r_j - r_i\|} \tag{3}$$

其中， f 是一个连续，单调递增函数，表示第 i 个 AUV (AUV_i) 的虚拟领航者对其自身的吸引力，它随着 AUV_i 与虚拟领航者间距离 r 的增大而增大； g 是一个连续函数，表示周围的邻居对 AUV_i 的斥力，它随着 AUV_i 与虚拟领航者距离 r 的增大而减小，如图 2。当 AUV 之间的距离趋近于 0 时，斥力 g 趋近于无穷大，由此可以避免 AUV 之间的碰撞。 r_{id} 是 t 时刻 AUV_i 的虚拟领航者的位置矢量。引入参数 $\omega(t)$ ，定义 $\Omega := \{\omega | 0 < \omega \leq 1\}$ ，并要求 $\omega(t) \in \Omega$ ， $\forall i, t > 0$ ，以保证当 AUV_i 离它的虚拟领航者足够近时，它和邻居 AUV 间的斥力项会在控制律中消失， AUV_i 的所有邻近 AUV 的定义为 $N_i \triangleq \{j | \|r_i - r_j\| < r\}$ 。

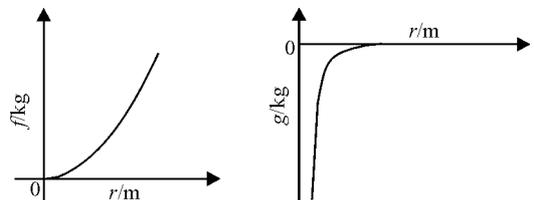


图 2 作用力 f 与 g 的函数图

式 (3) 的第一项驱使 AUV_i 靠近其虚拟领航者，以此形成期望的编队队形，第二项控制 AUV_i 与其所有邻居 AUV 之间的距离以避免碰撞。

由式 (1)、(3) 可得 \dot{r}_i ，表示如下：

$$\begin{aligned} \dot{r}_i = & \omega(t) f(\|r_{id} - r_i\|) \frac{r_{id} - r_i}{\|r_{id} - r_i\|} + \\ & (1 - \omega(t)) \sum_{j \in N_i(t)} g(\|r_j - r_i\|) \frac{r_j - r_i}{\|r_j - r_i\|} \end{aligned} \quad (4)$$

定义 $\tilde{r}_i = r_i - r_{id}$, 则式(4)化为:

$$\begin{aligned} \dot{\tilde{r}}_i = & -\omega(t) f(\|\tilde{r}_i\|) \frac{\tilde{r}_i}{\|\tilde{r}_i\|} + \\ & (1 - \omega(t)) \sum_{j \in N_i(t)} g(\|r_j - r_i\|) \frac{r_j - r_i}{\|r_j - r_i\|} - q(t) \end{aligned} \quad (5)$$

其中 $q(t) = \dot{r}_{id}(t)$ 为虚拟领航者的速度, 并规定所有虚拟领航者具有相同的速度。定义在 t 时刻 AUV_{*i*} 的盲区区域 $B_i(t)$, 是以位置矢量 $r_{id} + \tilde{r}_i^*$ 为圆心, 半径为 α 的一个圆形区域:

$$B_i(t) = \left\{ r(t) \mid \|r(t) - r_{id}(t) - \tilde{r}_i^*(t)\| \leq \alpha \right\} \quad (6)$$

$\alpha \in [0, d/2)$ 为一个常数, \tilde{r}_i^* 是 $\omega_i(t) = 1$ 时式(5)的解, 因为函数 f 是一个预定义的连续、单调递增函数, \tilde{r}_i^* 在任意 t 时刻都有唯一解, 则可得式(7)来计算 \tilde{r}_i^* :

$$\tilde{r}_i^* = -\frac{q(t)}{\|q(t)\|} f^{-1}(\|q(t)\|) \quad (7)$$

由盲区概念引入, 可得 $\omega_i(t)$ 的表达式如下:

$$\omega_i(t) = \begin{cases} 1 & \|r_i(t) - r_{id}(t) - \tilde{r}_i^*(t)\| \leq \alpha \\ \omega_i(t) & \|r_i(t) - r_{id}(t) - \tilde{r}_i^*(t)\| > \alpha \end{cases} \quad (8)$$

考虑式(3)所描述的系统。假设编队中至少有 2 个 AUV, AUV_{*i*} 和 AUV_{*j*}, 满足以下条件:

$$\omega_i(t) \neq \omega_j(t), \quad t \geq 0 \quad (9)$$

那么 AUV 群就不能形成并保持期望的队形。

证明: 假设 AUV 群能在 t_f 时刻形成期望队形, 并在 $t > t_f$ 保持队形。那么 AUV 的位置必满足:

$$r_i = r_{id} + a(t) \quad \forall i, t > t_f$$

其中 $a(t) \in R^2$ 是 t 时刻每个 AUV 与其虚拟领航者的相对位移, 其对每个 AUV 是相等的。那么式(4)就化为:

$$\omega_i(t) f(\|a(t)\|) \frac{a(t)}{\|a(t)\|} = -q(t) - \dot{a}(t), \quad \forall i, t > t_f \quad (10)$$

f 是连续单调递增函数, 且对每个 AUV 的作用是相同的, 所以式(10)中 $\omega_i(t)$ 的值在每一个 t 时刻是唯一的, 并满足:

$$\omega_i(t) = \omega_j(t), \quad \forall i \neq j, i, j \in [1, \dots, N], t \geq t_f \quad (11)$$

式(9)与式(11)矛盾, 所以得证。如果需要运用具备盲区的编队设计, 使之能形成并保持期望队形, 那么对于 $\omega_i(t)$, $\forall i$, 必须满足式(11)。

图1的(a)和(b)显示了 3 个 AUV 在 t 时刻组成了三角形编队。在图中, 黑点表示了编号为 1, 2, 3 的 3 个 AUV 在 t 时刻的位置; 3 个环形圆圈表示了对于这些 AUV 的盲区区域 $B_i(t)$; 星号表示这些区域的几何中心, 也就是圆心。3 个盲区圆心的中心的位置矢量为 $r_{id} + \tilde{r}_i^*$ 。

图1(a)中所有的 AUV 都在它们的盲区内, 所以 $\omega_i = 1$, ($i=1, 2, 3$), 即每个 AUV 只受到它们 virtual leaders 的引力的作用。因为盲区的半径 $\alpha \in [0, d/2)$, 所以 3 个盲区之间没有相互重叠, 那么 AUV 之间就不会发生碰撞。

图1(b)中第 1 个 AUV 在 $B_1(t)$, 但是第 2 个和第 3 个 AUV 却不在 $B_2(t)$ 和 $B_3(t)$ 内, 不过第 2 个 AUV 却在 $B_1(t)$ 内。因此可知 $\omega_1 = 1$, $\omega_2 < 1$, $\omega_3 < 1$ 。第 1 个 AUV 只受到它的虚拟领航者的引力作用而不和它的邻居 AUV 进行通信, 所以它并不知道有第 2 个 AUV 的存在。而第 2 个 AUV 却知道第 1 个 AUV 的存在, 并通过和第 1 个 AUV 的通信远离第 1 个 AUV, 从而避免碰撞。如果第 3 个 AUV 在第 1 个 AUV 的邻域范围内, 那么它和第 2 个 AUV 的情况是一样的。由上面的分析可知: $B_i(t)$ 之所以叫做盲区, 是因为当 $r_i(t) \in B_i(t)$ 时, 它可以无视它的邻居 AUV 的存在。

由上面的分析介绍可知: 式(3)描述的控制律可以使一队 AUV 保持一个期望的队形, 避免相互碰撞, 并可以有效的减少 AUV 间的通信需要。

3 仿真结果与分析

对基于虚拟领航者和盲区概念的控制规则进行仿真, 如图 3、图 4。

图 3 中的 4 个 AUV 的初始位置在半径为 15 的圆内随机分布, 初始速度为零; 取 $f(\|z\|) = 0.04 \|z\|^2$, $g(\|z\|) = -10e^{-0.5\|z\|}$, $d = 12$ m, $a = 5$ m。由图 3 可见, 所有的 AUV 在 $t=5$ 的时刻进入各自盲区并趋向于中心点, 最终 AUV 编队形成并保持期望队形。图 4 显示 AUV 编队延期望路径运动的轨迹(运动轨迹起点位于图形的左下角)。由仿真

结果可见，4 个 AUV 跟随正方形排列的 4 个虚拟领航者，并以速度 $q = (5,5) \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 稳定的收敛到正方形的编队。可见笔者提出的基于虚拟领航者和盲区概念的控制规律是稳定的。

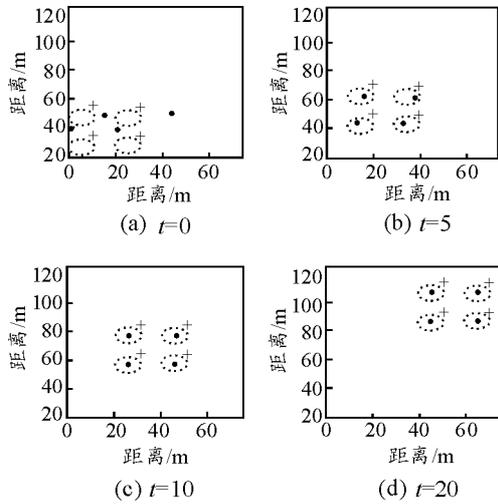


图 3 AUV 编队的形成与保持

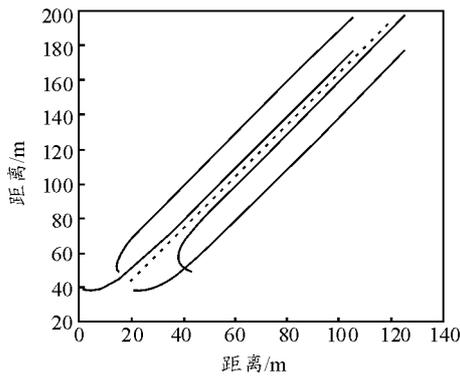


图 4 AUV 编队的运动轨迹

4 结论

由仿真结果可知，所给出的编队控制律满足设计要求，笔者提出的基于虚拟领航者和盲区概念的控制规律是稳定的，仿真结果与理论分析完全相符。该控制律还可以用于机器人、船舶等运动体的编队控制。由于笔者尚未考虑 3D 情况下的编队航行，还将做进一步研究。

参考文献:

[1] Tangirala S, Kumar R, Bhattacharyya S, et al. Hybrid-Model based hierarchical mission control architectur for autonomous underwater vehicles[C]. American Control

Conference. Oregon: IEEE Press, 2005(1): 668-673.
 [2] Okamoto A, Edwards D B, Anderson M J. Robust control of a platoon of underwater autonomous vehicles[J]. Sea Technology, 2005, 46(12): 10-13.
 [3] 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.
 [4] Kalantar S, Zimmer U R. Distributed shape control of homogeneous swarms of autonomous underwater vehicles[J]. Autonomous Robot, 2007, 22(1): 37-53.
 [5] Kumar R, Stover J A. A Behavior-Based Intelligent Control Architecture with Application to Coordination of Multiple Underwater Vehicles [J]. IEEE TRANS. SMC, 2000, 30(6): 767-784.
 [6] JTFeddema. Decentralized Control of Cooperative Robotic Vehicles: Theory and Application[J]. IEEE TRANS. Robot. 2002, 19(5) : 852-864.
 [7] Khatib O. Real-time obstacle avoidance for manipulators and mobile robots[J]. International Journal of Robotic Research, 1986, 5(1):90-98.
 [8] Balch T, Arkin R C. Behavior-based formation control for multi-robot teams[J]. IEEE Trans on Robotics and Aut, 1998, 14(6): 1-15.
 [9] Baras J S, Tan Xiaobo, Hovareshti P. Decentralized control of autonomous vehieles[C]. 42nd IEEE Confereneeon Decisionand Conirol, 2003, 10(2): 1532-1537.
 [10] Ge S S, Fua C H, Liew W M. Swarm Formations Using the Ggeneral Gormation Potential Function[C]. in: Proceedings of the 2004 IEEE Conference on Automation and M echatronics. Singapore, 2004: 655-660.
 [11] Leonard N E, Fiorelli E. Virtual Leader, Artificial Potentials and Coordinated Control of Groups[C]. in: Proceedings of the 40th IEEE Conference on Decision and Control. Orlando, Florida, 2001: 2968-2973.
 [12] Pereira G A S, Das A K, Campos M F M. Formation Control with Configuration Space Constraints[C]. in: Proceedings of the 2003 IEEE/RSJ International Conference on Robots and Intelligent Systems. Las Vegas, Nevada, 2003: 2755-2760.
 [13] Khatib. Real-time obstacle avoidance for manipulators and mobile robots[J]. International Journal of Robotics Research, 1986, 5(1): 290-298.
 [14] Leonard N E, Fiorelli E. Virtual Leader, Artificial Potentials and Coordinated Control of Groups[C]. in: Proceedings of the 40th IEEE Conference on Decision and Control. Orlando, Florida, 2001: 2968-2973.
 [15] Xi Xiaorui, Abed E H. Formation Control with Virtual Leaders and Reduced ommunications[C]. in: Proceedings of the 44th IEEE Conference on Decision and Control. Seville, Spain, 2005: 1854-1860.