

中图分类号: TP 391.9 文献标识码: A

基于 MAS 的多 UUV 编队智能优化控制

李宏宏 康凤举 顾浩

(西北工业大学 航海学院 陕西 西安 710072)

摘要: 针对无人水下航行器(Unmanned Underwater Vehicle, UUV)编队航行的实际背景和限制条件,提出了一种基于多智能体系统(MAS)技术的多 UUV 编队智能控制方法。利用多 Agent 之间的交互作用,以灵活便捷的方式进行各 UUV 之间的协同优化,从而实现多个 UUV 的自主编队航行。考虑到控制器在编队保持中的重要性,对面向 UUV 编队航行的控制率和实现算法进行了重点研究,设计了 UUV 编队控制器,并通过仿真实验验证了该算法的鲁棒性和稳定性,最后对多 UUV 编队智能控制方法进行了仿真验证和分析。

关键词: Agent; 无人水下航行器; 编队控制; 人工智能

Intelligent Optimizing Control of Formation for UUVs Based on MAS

Li Honghong, Kang Fengju

(Marine College, North Western Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

Abstract: The multi-agent system(MAS) based strategy and corresponding implementing algorithms for UUVs formation navigation are proposed according to aviation characteristics and practical constraints of UUVs. The coordinative optimizations among every individual UUV are carried out with flexible and smart ways by interactive communications and information feedback in MAS so as to implement the autonomous formation navigation of UUVs. Furthermore the control law and corresponding algorithms of the UUV controller in the formation process are studied in depth based on the controller in the formation keeping and simulation results verify the robustness and stability of the formation controllers. Finally, the formation intelligent control method was verified by simulated verification and comparative analysis.

Key words: agent; unmanned underwater vehicle; formation control; artificial intelligence

1 引言

UUV 是人类开发和利用海洋的有效工具。随着使命需求的不断复杂化和多样化,仅仅通过追求单个 UUV 某些性能指标的最优已经远远不能满足要求。于是研究人员把目光投向了由多

个 UUV 组成的多 UUV 编队系统。多 UUV 编队指的是多个 UUV 为适应任务要求而进行的某种队形排列和任务分配的组织模式,包括编队的队形产生、保持和变化,也包括航行任务的规划和组织。多 UUV 系统中的 UUV 能通过信息共享在航行中改变原有队形,自主智能地处理突发事件,并根据具体情况来分担各自的任务。

基金项目: 水下信息处理与控制国家重点实验室基金资助项目(9140C2305041001)

多 UUV 编队协同执行任务不仅可以弥补单个 UUV 执行任务时的缺陷,还可有效提高其工作效率,拓宽其使用范围。各个国家都已经开始多 UUV 编队方面的相关研究。其中美国在这方面一直处于领先地位。如:美国海军开展的“近期水雷探测系统(NMRS, Near Mine Research System)”和“远期水雷探测系统(LMRS, Long Mine Research System)”研究^[1],用于在浅海执行隐蔽水雷侦查任务。系统均由两台装备有前视搜索声纳和测扫分类声纳的 UUV 组成。1998 年 6 月,在纽芬兰的 Stephenville 附近成功完成了近期水雷探测系统联合反水雷先进概念技术演示。为了实现美国海军 UUV 总体规划(MasterPlan)中提出的水下考察、测量和辅助通信/导航能力,Bluefin 机器人技术公司等多家单位联合开展了一项“分布式侦察与探测的协作自主性(CADRE Cooperative autonomy Fordistributed Reconnaissance and Exploration)”研究。系统由 C/NA, SCM 和 RI 三种不同类型的 UUV 组成,分别执行导航、探测和识别水雷等使命。美国海军已将 Hydroid 公司研制的 REMUS(Remote Environmental Monitoring UnitS) 小型 UUV 应用于实际的反水雷使命中,在 2003 年“伊拉克自由”行动中利用多台 REMUS 对通往乌姆盖斯尔港口的航道进行调查清理,如果没有这些小型 UUV 的加入,这次行动将需要 21 d 持续不断的潜水作业,而事实是只做了 16 h,连续水下作业就结束了。

编队控制要解决的方法主要可分为三类:分别为主从编队法、基于行为编队法以及虚拟结构编队法。主从编队模式,如果主 UUV 失效,整个编队就无法保持,还存在主 UUV 与从 UUV 相对独立的缺点,主 UUV 不容易得到从 UUV 的跟踪误差反馈,如果主 UUV 速度过大,从 UUV 可能无法及时跟踪等缺点。行为法的缺点是难以对系统进行数学分析和相应的稳定性分析;虚拟结构法的缺点是难以进行容错处理,且需要进行大量通讯,是一种集中控制的方法,可靠性较差^[2]。由此,本文利用 Agent 的自主性和协作性,提出了基于 MAS 的多 UUV 编队智能控制模式,并设计

了该编队模式的控制器,实现了多 UUV 编队智能控制。

2 多 UUV 编队结构体系

多 UUV 编队系统具有自主性、交互性、协作性和实时性等特点,可将其看作一个多智能体系系统(Multi Agent System)^[3]。要实现多 UUV 的编队控制需要在传统的主从编队的基础上,采取分布式控制策略,按照分组的概念把多 UUV 编队分割成若干个主从编队,每个单元编队之间又是紧密联系的,最终实现多 UUV 的编队控制。针对主 UUV 失效、跟踪丢失等情况,在此利用 Agent 的自主性和适应性设计了 UUV 的智能模块,通过该 Agent 可以实现多 UUV 编队的智能控制。

2.1 基于 Agent 的多 UUV 编队

基于 Agent 的 UUV 具有自主性、反应性、社会性和主动性等四个基本属性^[4]。应该能够感知周围的环境,并灵活、自主地实现一系列的目的或者解决一系列的问题。根据 UUV 的功能行为和结构,单个 UUV 应该由感知模块、信息融合模块、知识库、智能决策模块、通信模块、反射模块和行动控制模块组成。建立 UUV 的 Agent 体系结构如图 1 所示,各模块之间具有复杂的信息交互,包括消息、指令等。

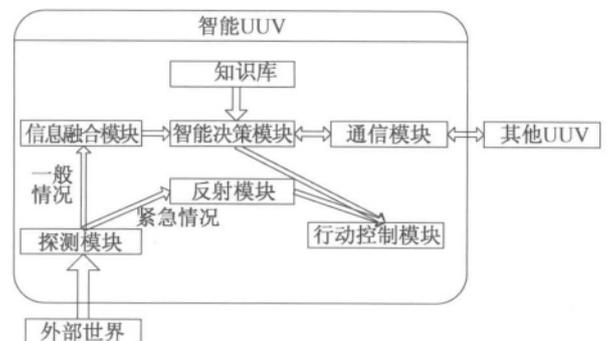


图 1 UUV 的 Agent 体系结构
Fig.1 Agent architecture of UUV

这几类模块的功能描述如下:

感知模块:通过本机的传感器等探测设备获得主 UUV 和从 UUV 的位姿、速度等信息并感知

外界环境的态势。

信息融合模块:接收感知模块传递的数据进行数据融合处理提取出重要的数据信息。

智能决策模块:综合本机信息融合模块和通信模块发来的信息,利用知识库进行推理、分析和优化,得出本机的控制的指令,将该指令传给行动控制模块,也包括在跟踪丢失主UUV或任务需要情况下的主从角色变换。

反射模块:在紧急情况下直接接收感知模块发来的紧急情况发出条件反射动作。

知识库:UUV系统编队控制系统控制策略的知识规则库,包括水下编队控制的规则控制和过程控制策略,实现控制执行器的行为仿真模型和知识专家系统等。

通信模块:负责与其他UUV的通信模块进行通信,并将接收到的信息传回智能决策模块。

行动控制模块:接收行动控制指令,按照指令控制UUV按照规划出航迹运动。主要包括航迹的规划和编队的跟踪控制。

各模块在解决各自问题的基础上采取联合行动,协调各自的知识、目标和策略规划,最终完成特定的任务。

为了保持编队控制,为每个UUV都另配有编队控制模块。因此,主从式UUV编队的组织结构如图2所示。

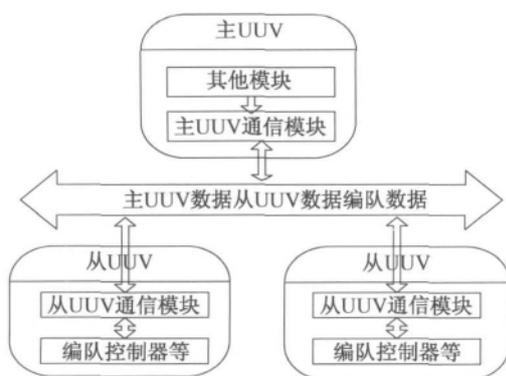


图2 主从式UUV编队组织结构

Fig. 2 Formation structure of master-slave UUV

在该结构中,如果从UUV跟踪丢失主UUV,智能决策模块会将从UUV角色转化为主UUV角

色继续执行任务,并发出请求组成编队的信息,当获取到其他主UUV发出的编队组成信息时,可以与之组成新的主从编队,共同完成任务。

2.2 控制策略与协调机制

为了实现多UUV的编队控制,在传统的主从编队的基础上,按照分组的概念把多UUV编队分割成若干个主从编队,每个单元编队之间又是紧密联系的。因此编队组成如图3所示。

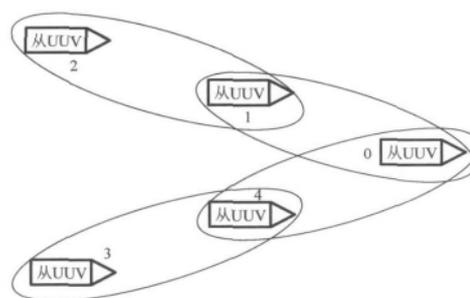


图3 多UUV编队组成

Fig. 3 UUV formation

在多UUV编队中,主UUV的行为包括按照预先给定的航迹航行以及躲避障碍和转换队形等,负责编队的协调管理。从UUV的行为包括跟随主UUV航迹、保持与主UUV的相对运动、转换队形等。在编队中每个UUV都是一个智能Agent。具有主、从UUV的所有功能,并可以根据情况决策自己的角色是主UUV还是从UUV。

初始状态下按照层级的概念把多UUV编队分割成若干组双UUV编队,每个单元编队之间又是紧密联系的,最终实现多UUV编队。图3中,UUV 3跟随UUV 4并保持与UUV 4的相对位置以保持其在队列中的位置。UUV 4跟随UUV 0并保持自己的位置。根据任务需求,UUV 4可以工作在从UUV模式并控制UUV 3,跟随UUV 0共同组成一个大编队。当UUV 0失效或者根据任务需求需要两个UUV去完成时,UUV 4可以转换角色为主UUV带领UUV 3脱离编队独立去完成任务。整体编队不会因为这两个的脱离而混乱。在突防阶段,单个UUV可以脱离编队诱导来袭的敌方武器。在UUV转入攻击阶段后,UUV编队还

可以分拆为多个编队,从不同方向对敌方进行攻击,因此这样的可以随时分拆、组合的编队更加适应了作战的需求。

3 多 UUV 编队控制器设计

重点研究从 UUV 的编队控制 Agent 的设计,这里从 UUV 编队控制 Agent 的作用是跟随主 UUV 的位姿和速度,使主 UUV 和从 UUV 之间的相对距离、航向角、高度和速度的变化都限制在很小的误差范围内。

3.1 编队过程运动学模型

以两个 UUV 斜线编队航行为例进行分析。设编队中领队的 UUV 为主 UUV (L), 跟随 UUV 为从 UUV (W)。主 UUV 和从 UUV 处于某一水平面内(同一深度)斜线编队,即不考虑 Z 方向的深度。在图 4 的参考坐标系中标出了主 UUV 和从 UUV 的瞬时位置和速度向量^[5]。

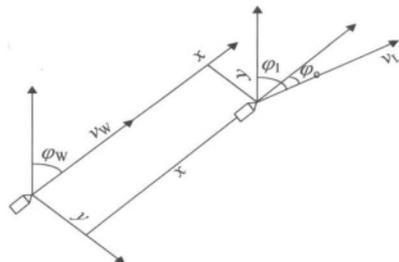


图 4 主 UUV 和从 UUV 的瞬时位置和速度向量
Fig. 4 Position and velocity vector of master and slave UUV

在参考坐标系中,主 UUV 和从 UUV 之间的相对运动学方程如下:

$$\frac{dx}{dt} = v_L \cos \varphi_e + y \dot{\varphi}_W - v_w \quad (1)$$

$$\frac{dy}{dt} = v_L \sin \varphi_e - x \dot{\varphi}_W \quad (2)$$

x 、 y 为主 UUV 和从 UUV 之间相对距离在从 UUV 的局部坐标系上的 X 分量和 Y 分量。 v_L 和 v_w 分别为主 UUV 和从 UUV 的瞬时速度。 φ_L 和 φ_w 分别为主 UUV 和从 UUV 的航向角。其中航向角误差为 $\varphi_e = \varphi_L - \varphi_w$ 。

3.2 UUV 编队航行控制模型

为保持编队队形,每个 UUV 都应当安装有编队保持器。在此采用一阶编队保持器动力学模型,可用以下一阶微分方程来描述^[6]:

$$\dot{v}_W = -\frac{1}{T_{v_w}} v_W + \frac{1}{T_{v_w}} v_{Wc} \quad (3)$$

$$\dot{\varphi}_W = -\frac{1}{T_{\varphi_w}} \varphi_W + \frac{1}{T_{\varphi_w}} \varphi_{Wc} \quad (4)$$

$$\dot{v}_L = -\frac{1}{T_{v_L}} v_L + \frac{1}{T_{v_L}} v_{Lc} \quad (5)$$

$$\dot{\varphi}_L = -\frac{1}{T_{\varphi_L}} \varphi_L + \frac{1}{T_{\varphi_L}} \varphi_{Lc} \quad (6)$$

式中: T_{v_w} 为从 UUV 的速度时间常数; T_{φ_w} 为从 UUV 的航向角时间常数,下标 c 表示控制量; v_L 为主 UUV 的速度时间常数; T_{φ_L} 为主 UUV 的航向角时间常数,从 UUV 的 v_{Wc} 、 φ_{Wc} 为编队保持器的输入控制量,而主 UUV 的 v_{Lc} 、 φ_{Lc} 看成是扰动量。式(1) (2) 为非线性方程,应用小扰动和小角度假设,对其进行线性化处理并整理可得两个 UUV 编队航行的数学模型为:

$$\dot{x} = v_L - \frac{y_0}{T_{\varphi_w}} \varphi_W + \frac{y_0}{T_{\varphi_w}} \varphi_{Wc} - v_w \quad (7)$$

$$\dot{v}_W = -\frac{1}{T_{v_w}} v_W + \frac{1}{T_{v_w}} v_{Wc} \quad (8)$$

$$\dot{y} = \left[\frac{x_0}{T_{\varphi_w}} - v_L \right] - \frac{x_0}{T_{\varphi_w}} \varphi_{Wc} + v_L \varphi_L \quad (9)$$

$$\dot{\varphi}_W = -\frac{1}{T_{\varphi_w}} \varphi_W + \frac{1}{T_{\varphi_w}} \varphi_{Wc} \quad (10)$$

$$\dot{v}_L = -\frac{1}{T_{v_L}} v_L + \frac{1}{T_{v_L}} v_{Lc} \quad (11)$$

$$\dot{\varphi}_L = -\frac{1}{T_{\varphi_L}} \varphi_L + \frac{1}{T_{\varphi_L}} \varphi_{Lc} \quad (12)$$

按照以上对状态量、控制量和干扰量的定义,状态量 $X = [x \quad v_w \quad y \quad \varphi_w]^T$, 控制量 $U = [v_{Wc} \quad \varphi_{Wc}]^T$, 干扰量 $U_L = [v_L \quad \varphi_L]^T$ 。可得到线性状态空间方程的表达式为

$$\dot{X} = AX + BU + IU_L \quad (13)$$

此时系统矩阵

$$A = \begin{pmatrix} 0 & -1 & 0 & -\frac{y_0}{T_{\varphi_w}} \\ 0 & -\frac{1}{T_{v_w}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \left[\frac{x_0}{T_{\varphi_w}} - v_L \right] \\ 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{T_{\varphi_w}} \end{pmatrix} \quad (14)$$

输入矩阵:

$$B = \begin{pmatrix} 0 & \frac{y_0}{T_{\varphi_w}} \\ \frac{1}{T_{v_w}} & 0 \\ 0 & -\frac{x_0}{T_{\varphi_w}} \\ 0 & \frac{1}{T_{\varphi_w}} \end{pmatrix} \quad (15)$$

扰动矩阵:

$$F = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & v_L \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (16)$$

3.3 控制器设计

由以上状态方程可以得出 y 通道的误差信号由间距偏差信号和航向角偏差信号线性合成, 增益分别为 K_y, K_φ 。以 e_y 为偏差信号, 采用 PI 控制律得到航向角控制指令 φ_{wc} 的表达式^[7]:

$$\varphi_{wc} = K_{yp}e_y + K_{yi} \int_0^t e_y dt \quad (17)$$

式中: K_{yp} 为比例项的控制增益; K_{yi} 为积分项的控制增益。

类似于 y 通道, x 通道的综合误差信号由 x 向间距偏差信号和速度偏差信号线性合成, 采用 PI 控制律得:

$$v_{wc} = K_{xp}e_x + K_{xi} \int_0^t e_x dt \quad (18)$$

其中: x 通道的综合误差:

$$e_x = K_x x + K_v e_v \quad (19)$$

y 通道的综合误差:

$$e_u = K_y y + K_\varphi e_\varphi \quad (20)$$

本文中提出的编队模式不是紧密编队模式, 建立的数学模型没有考虑紧密编队航行过程中主 UUV 对从 UUV 的动力学影响, 故不需要考虑航行的动力学方程, 这样降低了数学建模的复杂性。

3.4 仿真计算与结果分析

为了验证以上算法的正确性, 在此利用上述算法编写了两个主从 UUV 保持编队队形的仿真平台, 在此用该平台验证此算法的鲁棒性和稳定性, 并得出 PI 控制器各个增益的值以及 x, y 方向上两个 UUV 的距离保持值。

此设主 UUV 位置为 (2 500, 2 500), 速度为 $v_L = 10$ m/s, 航向角 $\varphi_L = 45^\circ$, 从 UUV 位置在 (2 100, 2 400), 速度 $v_w = 20$ m/s, 航向角为 10° 。设主 UUV 和从 UUV 相对距离期望值为 200 m, 相对角度差为 30° 。当主 UUV 的速度和航向角都不发生变化时, 对两个 UUV 编队航行控制系统的仿真结果如图 5—图 8 所示。

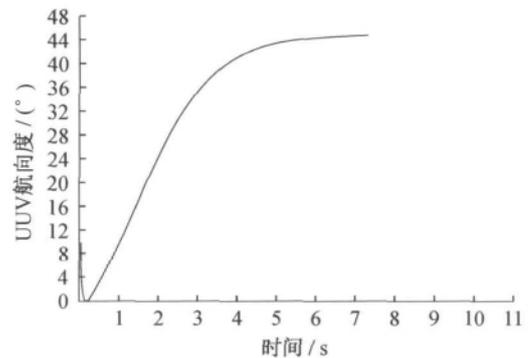


图 5 从 UUV 对主 UUV 的角度跟踪

Fig. 5 Angle tracking from master UUV to slave UUV

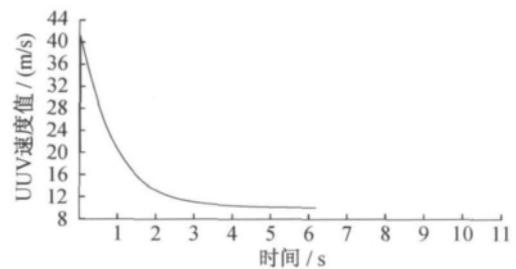


图 6 主 UUV 对从 UUV 的速度跟踪

Fig. 6 Velocity tracking from master UUV to slave UUV

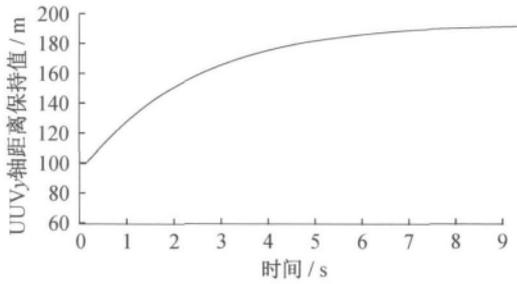


图7 主从UUV在Y轴方向的距离保持

Fig.7 Distance tracking from master UUV to slave UUV

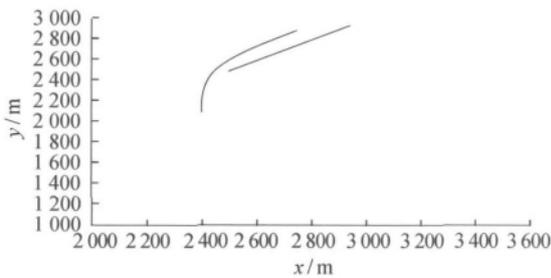


图8 两个UUV的编队队形运行轨迹

Fig.8 Formation flying orbit of two UUV

仿真结果表明:基于PI控制律设计的控制系统是稳定的,稳态误差几乎为零,最终可以达到控制目的。PI控制系统响应速度较快,从UUV的角度,速度均能较好地跟踪主UUV,并能保持两UUV的相对距离和角度。主UUV可以带领编队机动,因此,这种方法可以用于多UUV的编队控制中。

4 工程应用开发

基于VC++开发环境本文开发了一个多UUV编队控制分布式仿真平台。系统结构图如图9所示。

该系统由二维态势节点、航迹图绘制、仿真时钟和九个UUV节点组成。各节点之间通过TCP/IP协议进行通信。其中二维态势节点从整体上展示编队的运行状况,航迹图节点实时绘制每个UUV的运动轨迹。时钟节点控制仿真的时间推进,UUV节点对各自UUV进行运动结算控制。

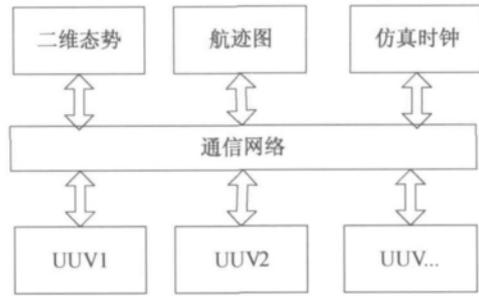


图9 系统结构图

Fig.9 System structure diagram

在此设计想定九个UUV随机分布在系统中,UUV任务为组成编队通过一个狭长海峡到达指定的区域。仿真开始后,首先由已经加入的UUV根据任务需求决定是否组成编队。在需要组成编队的情况下,由系统中的UUV协商决定谁是主UUV,然后根据主UUV的决策组成编队。其他从UUV进入编队跟随状态。组成人字形编队。在探测到狭长海峡的时候由主UUV发出指令变换队形为一字型队形通过海峡。通过海峡后恢复人字形编队向目标区域航行。实现的效果图如图10—图12所示。

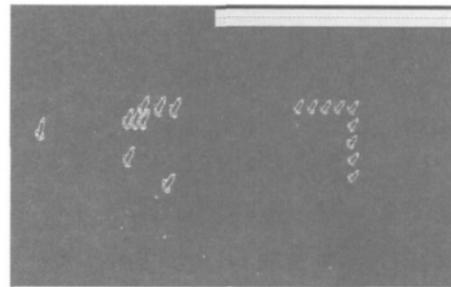


图10 UUV由初始化的位置变换成人字形编队的过程

Fig.10 Process of UUV formation change

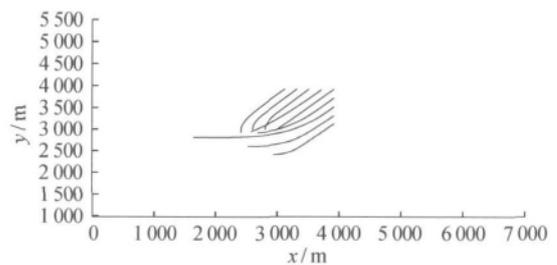


图11 变换成人字形编队航迹图

Fig.11 Track map of transform formation

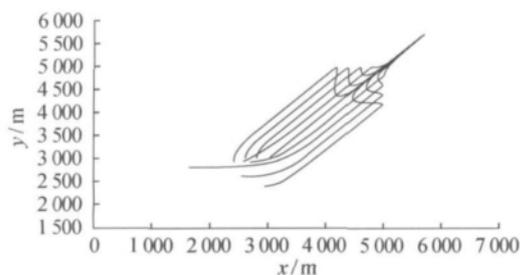


图 12 变换一字型编队的航迹图

Fig. 12 Track map of transform formation

5 总 结

针对多 UUV 编队航行的实际背景和约束条件,运用 Agent 技术,提出了一种新的基于 MAS 技术的协同优化控制策略和相应的实现算法。仿真结果验证了分布式控制结构在多 UUV 编队航行中的灵活性和有效性。结合 MAS 技术在实现协调优化策略时的优势和特点,重点讨论了从 UUV 编队飞行控制器的设计,通过一系列仿真实验验证了此类控制器的鲁棒性和稳定性。并实现了基于 MAS 的多 UUV 编队控制分布式仿真系统,验证了该方法在编队中应用的稳定性。从本文的研究结果出发,进一步的研究重点将放在单 UUV Agent 体系结构的优化、智能决策模块以及应急策略和整体性能的优化等方面。

参考文献:

- [1] 许真珍,封锡盛.多 UUV 协作系统的研究现状与发展[J].机器人,2007,29(2):186-192.
XU Zhenzhen, FENG Xisheng. Current status and future directions of multiple UUV cooperation system [J]. Robot, 2007, 29(2): 186-192.
- [2] 张晓琴,黄玉清,刘刚.基于改进的领导-跟随者编队算法研究[J].计算机工程与设计,2010,31(11):2547-2549.
ZHANG Xiaoqin, HUANG Yuqing, LIU Gang. Research on improved leader-following formation method [J]. Computer Engineering and Design, 2010, 31(11): 2547-2549.
- [3] 崔海英,石秀华,崔荣鑫.自主水下航行器主从式编队

控制[J].鱼雷技术,2007,15(4):42-44.

- CUI Haiying, SHI Xiuhua, CUI Rongxin. Leader-follower formation control of autonomous underwater vehicles [J]. Torpedo Technology, 2007, 15(4): 42-44.
- [4] 黄剑锋,刘付显,郭军.基于 Agent 的作战飞机编队决策行为模型[J].电光与控制,2009,16(1):92-96.
HUANG Jianfeng, LIU Fuxian, GUO Jun. Decision-making behavior model of aircraft formation based on agent [J]. Electronics Optics & Control, 2009, 16(1): 92-96.
- [5] 宗令蓓,谢凡,秦世引.基于 MAS 的无人机编队飞行智能优化控制[J].航空学报,2008,29(5):1326-1333.
ZONG Lingbei, XIE Fan, QIN Shiyin. Intelligent optimizing control of formation flight for UAVs based on MAS [J]. Acta Aeronautica Et Astronautica Sinica, 2008, 29(5): 1326-1333.
- [6] 朱战霞,郑莉莉.无人机编队飞行控制器设计[J].飞行力学,2007,25(4):22-24.
ZHU Zhanxia, ZHENG Lili. The controller design of UAV formation flight [J]. Flight Dynamics, 2007, 25(4): 22-24.
- [7] 马培蓓,张友安,于飞,等.多导弹编队保持控制器设计[J].飞行力学,2010,28(3):69-73.
MA Peipei, ZHANG Youan, YU Fei, et al. Design of multimissile formation hold controller [J]. Flight Dynamics, 2010, 28(3): 69-73.



李宏宏 男(1983-),河北石家庄人,博士生,主要研究方向为系统仿真技术。



康凤举 男(1947-),江苏无锡人,教授,博导,主要研究方向为系统仿真技术,计算机仿真。