

BDS 在仿生机器鱼中的应用研究

崔秀芳, 石福孝, 李培培, 陈刚, 王宏宇

(上海海洋大学 工程学院, 上海 201306)

摘要: 仿生机器鱼作为水下机器人行业的一个重要分支, 在探索海洋资源方面发挥着重要作用. 本文论述了北斗卫星导航系统(BDS)在仿生机器鱼中的应用, 并基于 BDS 的仿生机器鱼基本定位原理, 提出了多导航方式组合技术. 对基于 BDS 的仿生机器鱼机械结构进行了模块化设计, 说明了 BDS 在仿生机器鱼位姿解算以及路径规划技术中的应用, 设计并搭建了基于 BDS 的仿生机器鱼的硬件系统, 并在实验室自主设计的仿生机器鱼上实现.

关键词: 北斗卫星导航系统; 仿生机器鱼; 多导航方式组合技术; 应用

中图分类号: TP242 **文献标志码:** A **文章编号:** 1008-9268(2019)06-0070-05

0 引言

北斗卫星导航系统(BDS)是我国立足于国家经济和安全保护战略, 独立研制运营的卫星导航系统^[1], 具有高精度的导航定位功能, BDS 的导航精度可达 10 m, 延时低于 10 ns, 测速精度 0.2m/s, 还能进行短报文通信, 已经具备全球服务能力. BDS 还能兼容美国的 GPS 系统、俄罗斯的 GLO-NASS 以及欧盟的 Galileo. BDS 功能的日趋完善, 促进了 BDS 在工业、气象、农业、汽车行业以及智能家居等相关行业的大范围使用^[2].

仿生机器鱼的设计整体本着安全高效, 稳定性好, 灵活度高等原则^[3]. 它是一种智能化的产物, 可以完成自主游动和集群游动, 可以根据使用需求, 对各个探测模块进行自由组合, 以实现不同的功能. 仿生机器鱼作为探测海底世界的机械, 能够在水下环境检测、海底资源探索及开发利用等方面发挥自身特有的优势, 而且随着算法、人工智能(AI)以及定位导航技术的快速发展, 其技术获得进一步发展. 其中, 定位导航技术最为关键. BDS 具有精准定位, 短报文通信等功能, 能够与其他定位导航技术结合, 应用于水下仿生机器鱼的导航定位中, 为仿生机器鱼提供精准的导航定位及通信, 为路径规划、位姿解算等提供技术上的支持.

张钧凯等^[4]提出采用多导航方式组合技术来提升水下机械定位导航的实时性和精确度, 本文将文献^[4]中提出的技术运用于水下仿生机器鱼, 设计实验验证其相对于单一惯性导航具有更好的精确性. 崔秀芳等^[5]论述了 BDS 在船舶监测领域中的应用, 研究了 BDS 与船舶监测系统的通信方式以及如何通过上位机将检测信息由 BDS 卫星发送给船舶控制系统. 本文以文献^[5]中 BDS 与船舶监测系统的通信方式为基础, 设计出 BDS 与仿生机器鱼的通信过程.

1 BDS 在仿生机器鱼中应用的基本工作原理

1.1 仿生机器鱼水下导航定位的基本原理

机器鱼工作在水下, 卫星信号很难穿透水面, 因此, 本文以惯性导航技术和水声定位技术作为 BDS 导航定位技术的补充, 建立多导航方式组合系统, 使 BDS 导航定位技术成功地应用于水下. 该系统通过四颗 BDS 卫星接收浮标发出的信号, 浮标与机器鱼通过超声波通信, 然后通过 BDS 卫星计算出机器鱼的方位. 本组合系统中水面以上部分通过 BDS 收发信息, 水面以下部分是水声定位系统与仿生机器鱼通过超声波通信, 仿生机器鱼自

身还运用了惯性导航定位技术.图 1 为多导航方式组合技术图.通过上述导航方式组合,并用卡尔曼滤波法进行滤波,可以大大提高仿生机器鱼定位的精确性与实时性.

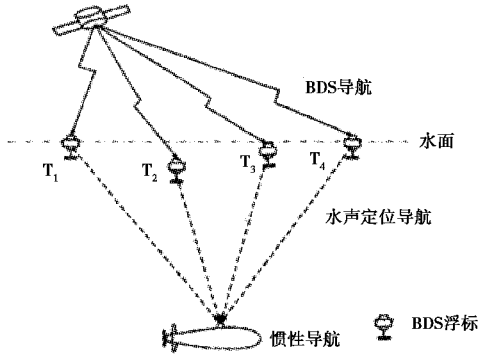


图 1 多导航方式组合技术图

BDS 卫星定位原理具体如下:设仿生机器鱼的坐标为 (X_0, Y_0, Z_0) 为未知参数,而用于定位的四颗卫星瞬时位置坐标已知,分别为 $(X_i, Y_i, Z_i), i = 1, 2, 3, 4$,BDS 浮标的坐标为 (X_5, Y_5, Z_5) ,以已知的卫星坐标为圆心,以四颗卫星坐标到浮标坐标的距离为半径,使用三维空间距离交汇的方法,先计算出浮标的三维空间坐标位置,具体计算公式如下:

$$[(X_1 - X_5)^2 + (Y_1 - Y_5)^2 + (Z_1 - Z_5)^2]^{1/2} + C(V_{t1} - V_{t5}) = D_1, \tag{1}$$

$$[(X_2 - X_5)^2 + (Y_2 - Y_5)^2 + (Z_2 - Z_5)^2]^{1/2} + C(V_{t2} - V_{t5}) = D_2, \tag{2}$$

$$[(X_3 - X_5)^2 + (Y_3 - Y_5)^2 + (Z_3 - Z_5)^2]^{1/2} + C(V_{t3} - V_{t5}) = D_3, \tag{3}$$

$$[(X_4 - X_5)^2 + (Y_4 - Y_5)^2 + (Z_4 - Z_5)^2]^{1/2} + C(V_{t4} - V_{t5}) = D_4, \tag{4}$$

$$D_i = C\Delta t_i, (i = 1, 2, 3, 4).$$

式中: C 为光速;即信号的传播速度; D_i 为四颗卫星分别与浮标之间的距离; Δt_i 为卫星信号到达浮标信号接收装置的时间; V_{ti} 为卫星时钟差,由卫星星历提供; V_{t0} 为浮标时钟差.再计算出仿生机器鱼相对于浮标的坐标 (X_6, Y_6, Z_6) 具体计算公式如下:

$$X = V\Delta t_0, \tag{5}$$

$$X_6 = X\cos \theta, \tag{6}$$

$$Y_6 = X\sin \theta, \tag{7}$$

$$Z_6 = X\cos(90^\circ - \theta), \tag{8}$$

式中: X 为浮标与仿生机器鱼的距离; V 为声波在

水中的传播速度; Δt_0 为浮标的声波信号到达机器鱼接收装置的时间; θ 为浮标与机器鱼连成的直线与水面的夹角.

$$X_0 = X_5 + X_6, \tag{9}$$

$$Y_0 = Y_5 + Y_6, \tag{10}$$

$$Z_0 = Z_5 + Z_6. \tag{11}$$

计算出仿生机器鱼相对于浮标的坐标后,再由式(9)~(11)即可计算出仿生机器鱼的三维坐标 (X_0, Y_0, Z_0) .

1.2 实现 BDS 水下定位的 BDS 浮标设计

浮标是实现 BDS 与水声定位系统联合导航定位的关键设备,是实现多导航方式组合的关键环节.该种浮标称为 BDS 智能浮标,其自身带有控制系统,将 BDS 卫星应答器连接到控制器上,用来接收 BDS 卫星信号,将声呐设备也连接在控制器上,接收机器鱼发出的超声波信号,浮标通过无线蓝牙设备与上位机通信.图 2 为 BDS 浮标系统结构图.浮标为 BDS 与机器鱼起到了通信中继的作用,该设备是 BDS 应用于水下必不可少的一环.

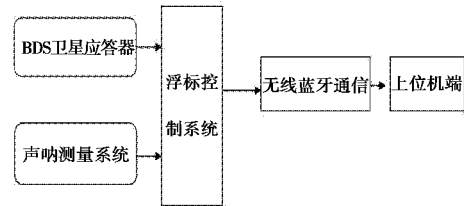


图 2 BDS 浮标系统结构图

2 BDS 在水下仿生机器鱼中的具体应用

BDS 应用于仿生机器鱼主要涉及到导航(路径规划)、定位(位姿解算)、传感器数据融合、运动控制等几项子技术,本文主要论述了仿生机器鱼在前两方面的具体应用.

2.1 仿生机器鱼系统组成结构

本文所述仿生机器鱼为本实验室自主设计,主

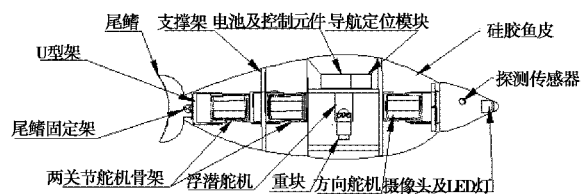


图 3 机器鱼的总体布局图

要有三个部分:头部、身体骨架和尾鳍.整个身体采用流线型,图 3 所示为机器鱼的总体布局图.电池、控制元件与导航定位模块(惯性导航模块和超声波接收器)安装于机器鱼身中间的上盒体内,其中,导航定位模块是整条机器鱼的心脏,它负责整个机器鱼的通信以及导航定位,浮潜舵机和重块安装在机器鱼的下盒体内,这样可以降低整个机器鱼的重心,使机器鱼在水下保持直立而不倾覆,机器鱼尾部采用两关节骨架,使整个尾部具有柔韧性,提高了仿生效果.

2.2 位姿解算

基于 BDS 的仿生机器鱼的一个重要应用是位姿解算,通过 BDS 快速定位与全球地理信息系统(GIS)结合,再运用相应的算法实时解算出运动中机器鱼的实时姿态信息.由于仿生机器鱼处于水下,电磁波在水下会慢慢减弱,而声波不会,所以依靠水为介质,能够很好地传递信息,这点和陆地机器人位姿解算有所区别.针对此特点,本文将寻找一种适用于水下机械通讯的位姿解算算法.文献[6]中提出了几种位姿解算的典型算法,比如:四元数法、方向余弦算法等,其中特别适合水下环境的是四元数算法.

本文仿生机器鱼位姿解算算法使用的是四元数法,四元数法在水下受到的干扰较小,所以特别适合仿生机器鱼.四元数的四个分量与机器鱼相对姿态角 θ (俯仰)、 φ (滚动)、 ψ (偏航)的关系表达式如下:

$$\theta = \arcsin[2(q_0q_2 - q_1q_3)], \quad (12)$$

$$\varphi = \arctan \frac{2(q_0q_1 + q_2q_3)}{q_0^2 - q_1^2 - q_2^2 + q_3^2}, \quad (13)$$

$$\psi = \arctan \frac{2(q_0q_3 + q_1q_2)}{q_0^2 + q_1^2 - q_2^2 - q_3^2}. \quad (14)$$

式中: q_0 、 q_1 、 q_2 、 q_3 表示四元数的 4 个分量,其值是由机器鱼的定位坐标和四元数微分方程联合计算所得.通过公式解出 θ 、 φ 、 ψ ,即可得出仿生机器鱼的运动姿态.

2.3 路径规划

基于 BDS 的仿生机器鱼另一个重要应用是路径规划,该功能在本系统中起着重要作用. BDS 能够计算出机器鱼游动路线中特定点的坐标,然后用相应的算法为机器鱼制定出最优或者次优路径,最后由浮标发送给机器鱼执行.路径规划简单来讲,就是人们预设了路径,让机器鱼在沿途躲过障碍物而无碰撞地到达终点^[7].和陆地机器人相似,仿生

机器鱼路径规划也可以分成两种,一种是环境已知的情况下,比如投篮机器人投篮的过程均为预先设计的路线,此过程为全局路径规划;另一种是环境未知的情况下,例如仿生探索机器鱼等在传感器信息的引导下自主地选择出最优的探测路径,此过程为局部路径规划.基于 BDS 的仿生机器鱼适合很多路径规划算法,比如:模糊法、遗传算法、数学几何法等.

本文仿生机器鱼路径规划功能实现使用的是模糊逻辑算法,其过程为:先利用 BDS 采集机器鱼定位数据,然后将数据模糊化,再按照模糊规则进行解模糊,最终实现运动控制.模糊逻辑算法的流程图如图 4 所示.其工作的主要决定对象是在未知情况下进行的,该算法计算量较小,原理简单,易实现.

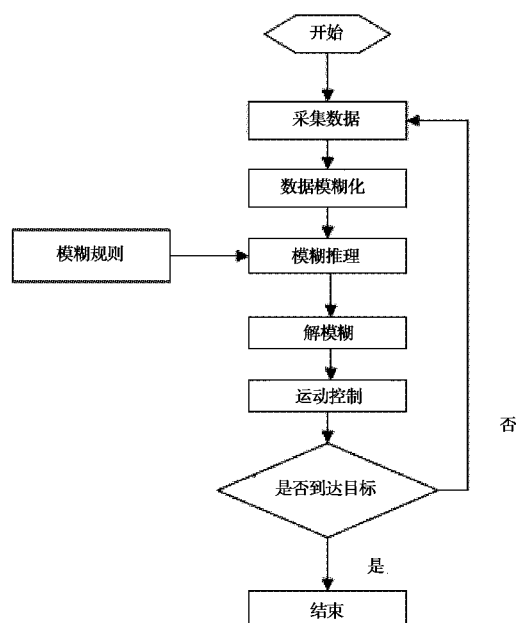


图 4 模糊逻辑算法的流程图

3 基于 BDS 的仿生机器鱼硬件设计组成

仿生机器鱼在浅海地区的游动过程,涉及到的硬件有通信模块、失控自救模块、能源及控制模块、探测模块等.只有所有模块全部正常工作的情形下,机器鱼才能完整地完预设的各项动作,更好地满足消费者的需求.

基于 BDS 的仿生机器鱼,利用 BDS 定位导航模块来解算其状态,进而进行姿态解算和控制动力

部件——舵机,BDS 定位导航模块将机器鱼的位置、姿态等相关数据和参数传给上位机进行反馈,通过上位机发送指令来协调机器鱼当前执行的作业任务,为机器鱼规划出最优航行路线,然后将最优航行路线发送给 BDS 浮标,BDS 浮标将控制信息发送给仿生机器鱼控制模块,控制模块将信息分析处理后发送给相应的舵机,让各个舵机实现不同角度的旋转,从而按照事先规划好的路径进行游动.基于 BDS 的仿生机器鱼硬件设计如图 5 所示.

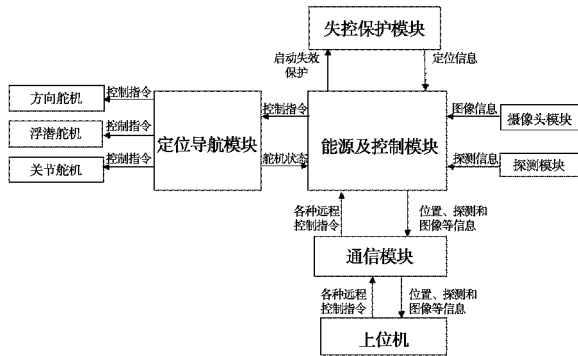


图 5 仿生机器鱼硬件设计图

4 仿真与实验

为了验证本文所述以 BDS 技术为主,以水声定位和惯性导航技术为补充的组合导航的定位精度^[8],现设计仿真实验.由于水下物体的深度可以用水深传感器测出,用此方法测得的深度结果精度较高,而且能够减小定位系统的计算量^[9],因此,用作对比验证.基于此方法对本文所述仿生机器鱼的北向与东向的定位实施仿真.在仿真过程中,设系统噪音和观察噪音都是高斯白噪音,陀螺时间漂移为 $0.1^\circ/h$,陀螺白噪声漂移为 $0.1^\circ/h$,加速度计零偏为 $10^{-4}g$.以东北向的地表坐标系为定位坐标系,为了验证单一惯性导航的发散性,将组合导航误差和单一惯性导航误差曲线列出,图 6、7 分别示出了两种导航方式的经度及纬度位置误差的仿真结果.

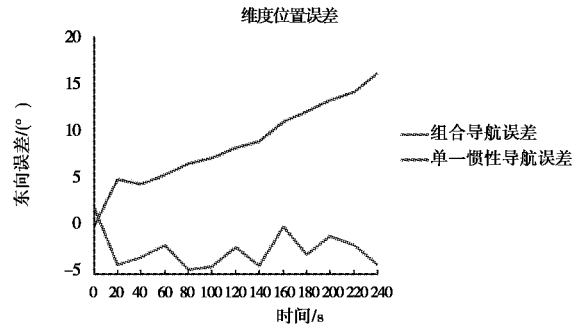


图 6 两种导航方式的纬度位置误差

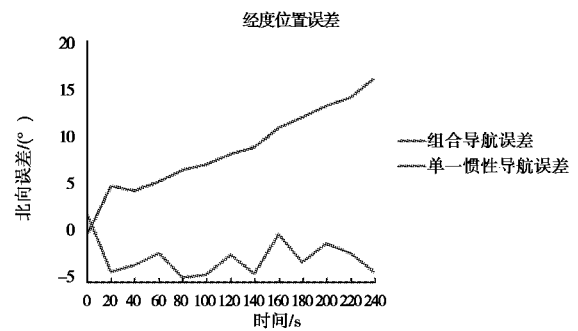


图 7 两种导航方式的经度位置误差

5 结束语

本文介绍了 BDS 应用于水下仿生机器鱼定位导航的基本原理,及以 BDS 为主的多导航方式组合技术,重点论述了 BDS 导航技术在仿生机器鱼中的具体应用,包括本实验室自主设计的仿生机器鱼的硬件设计组成、基于 BDS 来控制仿生机器鱼的运动、在自主设计的仿生机器鱼身上实现路径规划和位姿解算等功能.本文所介绍的以 BDS 为主的多导航方式组合导航技术可推进水下导航技术的发展,为高精度定位的仿生机器鱼定位系统的研究和各种控制算法的实现提供参考.随着通信以及机器人技术的迅速发展,定位导航方式将会越来越多元化,高精度定位的水下仿生机器鱼定位导航系统也将会更加智能化和普及化.

参考文献

- [1] 张慧莎. 高动态北斗导航自适应抗干扰技术研究[D]. 南京:南京理工大学, 2018.
- [2] 王永鼎,李华南,钱莹娟. 北斗卫星导航系统在 AUV 中的应用研究[J]. 全球定位系统, 2018, 43(1): 96-102.
- [3] 高心悦. 一种仿生机器人鱼设计与控制的研究[D]. 北京:北京邮电大学, 2017.
- [4] 张钧凯. 水下机器人导航定位技术研究[D]. 青岛:青岛科技大学, 2015.
- [5] 崔秀芳,李志刚,王宏宇,等. 基于北斗及嵌入式的船舶机舱温度监测系统[J]. 全球定位系统, 2018, 43(6): 120-125.
- [6] 尚留记,王硕. 导航技术及其在水下仿生机器人中的应用综述[C]//2008 第四届中国智能交通年会论文集, 青岛:科学技术部全国智能运输系统协调指导小组办公室, 2008: 1-7.
- [7] 李伟. 移动机器人的导航定位与路径规划[D]. 哈尔滨:哈尔滨工程大学, 2016.
- [8] 甘雨. 基于时频特性分析的 INS 误差处理及组合导航系统滤波模型精化[D]. 郑州:解放军信息工程大学, 2012.
- [9] 许辰希. 捷联惯导系统惯性器件的温度误差补偿[D]. 合肥:中国科学技术大学, 2014.

作者简介

崔秀芳 (1972—), 女, 副教授, 研究方向为海洋工程技术与装备研究、轮机工程等.

石福孝 (1994—), 男, 硕士研究生, 研究方向为水下机器人结构设计研究.

李培培 (1996—), 女, 硕士研究生, 研究方向为水下机器人控制系统研究.

Study on the application of BDS in bionic robot fish

CUI Xiufang, SHI Fuxiao, LI Peipei, CHEN Gang, WANG Hongyu

(College of Engineering, Ocean University of Shanghai, Shanghai 201306, China)

Abstract: As an important branch of the underwater robot industry, bionic robot fish plays an important role in exploring marine resources. This paper discusses the application of BeiDou Satellite Navigation System (BDS) in bionic robot fish and the basic positioning principle of bionic robot fish based on BDS. A multi-navigation combination technique is proposed. The modular design of bionic robotic fish mechanical structure based on BDS is used to explain the application of BDS in bionic machine fish posture calculation and path planning technology. The hardware system of the system's bionic robot fish is designed and based on BDS realized on the bionic robot fish designed by the laboratory.

Keywords: BeiDou Satellite Navigation System; bionic robot fish; multi-navigation combination technology; application