水下机器人协同控制的TO模型区域划分定位

陈嘉兴^{1,2}, 董怡靖¹, 赵晓旭¹, 刘志华^{3†}, 刘 扬¹

(1. 河北师范大学 中燃工学院, 河北 石家庄 050024; 2. 河北正定师范高等专科学校, 河北 石家庄 050800;

3. 河北师范大学 计算机与网络空间安全学院, 河北 石家庄 050024)

摘要:针对稀疏型水声传感器网络定位算法面临的定位覆盖率低和误差高的问题,本文提出一种水下机器人协 同控制的截角八面体(TO)模型区域划分定位算法.首先搭建定位系统模型,提出TO模型满足三维目标区域划分原 则,并证明其体积比相对最优;然后设计TO模型最优区域划分方式,提出最小值判定法进一步整合目标节点,自主 水下机器人(AUVs)协同控制筛选包含目标节点的子区域;通过分析通信半径和虚拟锚节点数量对实验结果的影响, 设置最优定位参数,降低能耗和定位误差,最后利用最小二乘法完成定位.本文分别对定位覆盖率、子区域AUV路 径长度和定位精度进行了仿真实验,结果表明,相比于其他区域划分方案,所提算法误差较小、定位覆盖率高且鲁 棒性强.

关键词:水声传感器网络;自主水下机器人;区域划分;TO模型;最小值判定法

引用格式: 陈嘉兴, 董怡靖, 赵晓旭, 等. 水下机器人协同控制的TO模型区域划分定位. 控制理论与应用, 2022, 39(11): 2028 – 2035

DOI: 10.7641/CTA.2022.11034

A region determination localization of TO-model for cooperative control of autonomous underwater vehicles

CHEN Jia-xing^{1,2}, DONG Yi-jing¹, ZHAO Xiao-xu¹, LIU Zhi-hua^{3†}, LIU Yang¹

(1. College of Engineering, Hebei Normal University, Shijiazhuang Hebei 050024, China;

2. Zhengding Advanced Normal College of Hebei, Shijiazhuang Hebei 050800, China;

3. College of Computer and Cyber Security, Hebei Normal University, Shijiazhuang Hebei 050024, China)

Abstract: Aiming at the problems of coverage and error of localization in underwater acoustic sensor networks (UASNs), a region determination localization algorithm of truncated octahedron (TO) model for cooperative control (TORD) of autonomous underwater vehicles (AUVs) is proposed in this paper. Firstly, the localization model is built, the truncated octahedron model (TO–model) is proved to meet the principles of three-dimensional region determination, and its volume ratio is proved to be relatively optimal. Then, the way of region determination is designed, a method of minimal judgement is proposed to further integrate these target nodes, and cooperative control of AUVs filters sub-regions containing target nodes. By analyzing the influence of communication radius and the number of virtual anchor nodes on the experimental results, and the optimal location parameters are set to reduce energy consumption and localization error. Finally, the least square method is used to complete the localization. In this paper, simulation experiments are carried out on the localization coverage of target nodes, the path length of sub-regions for AUVs, and localization accuracy, respectively. The results show that compared with other regional division schemes, the proposed algorithm has lower localization error, higher coverage and better robustness.

Key words: underwater acoustic sensor networks; autonomous underwater vehicles; region determination; TO-model; minimal judgement method

Citation: CHEN Jiaxing, DONG Yijing, ZHAO Xiaoxu, et al. A region determination localization of TO-model for cooperative control of autonomous underwater vehicles. *Control Theory & Applications*, 2022, 39(11): 2028 – 2035

收稿日期: 2021-10-26; 录用日期: 2022-04-26.

[†]通信作者. E-mail: hebtuliuzhihua@163.com; Tel.: +86 15227865118.

本文责任编委: 闫敬.

国家自然科学基金项目(61771181, 62171179, 62071167)资助.

Supported by the National Natural Science Foundation of China (61771181, 62171179, 62071167).

1 引言

水声传感器网络(underwater acoustic sensor networks, UASNs)的广泛应用为物联网在海洋领域的发 展提供了契机,其中定位系统是UASNs最典型的应用 之一,是辅助国防海域建设以及海洋资源开发利用的 重要技术手段.自主水下机器人(autonomous underwater vehicles, AUVs)是一种可充电和自主操作的移 动水下设备,其应用可涵盖海洋勘探、水下遗迹考 古^[1-2]等,非常适合协助UASNs执行数据收集和水下 定位等任务^[3].

由于洋流等原因, UASNs较易形成局部稀疏型网 络环境, AUV定位机制采用静态或动态路径规划技 术,在稀疏型网络结构中也可以有效定位目标节点, 单个AUV需要对目标区域进行多次扫描从而存在耗 费大量时间和精力的问题,因此,多AUV协同控制受 到了更多学者的关注^[4-6].如朱大奇等人^[7]针对AUV 动态任务分配,引入栅格信度函数概念,控制一组 AUV有效到达所有指定位置. LIY等人^[8]提出基于间 歇信念传播的航迹推算作为协同定位框架,旨在通过 水下机器人协作减缓定位误差的增长.此外,为解决 稀疏网络环境下定位覆盖率低并且能量浪费的问题, 一些学者基于AUV引入了区域划分策略,该策略主要 包括集中式算法和分布式算法,例如K-means聚类算 法和格子化分区方法^[9]. 对此, LIN Y等人^[10]通过对 水下立方体模块进行划分,利用AUV与目标节点之间 的信息完成定位,但未考虑信号重叠现象所造成的能 源浪费问题. 蒋俊正等人[11]提出了一种基于改进牛顿 法定位算法,该算法包括区域划分和分布式算法,提 高了稀疏型网络的定位精度,具有良好的延展性,但 是增加了算法复杂度. OJHA T 等人^[12]提出一种基于 AUV自适应定位方案,针对稀疏型UASNs 提供全网 定位服务,使AUV能够在稀疏网络中智能调整传输范 围,提高了定位覆盖率.LIUP等人^[13]针对稀疏型 UASNs提出一种基于spark的并行遗传算法来计算舒 伯特多峰函数的极值,得到UASNs的最优部署.SUY 等人[14] 提出一种三维环境下分区迭代定位机制,即 先对邻居节点进行定位,再依次定位外围节点,实现 了大规模目标节点的分层定位,有效降低了定位误差, 但对稀疏型网络,无法保证良好的定位覆盖率.SONG L等人^[15]提出一种基于六边形单AUV区域划分定位 算法,布放虚拟锚节点对部分目标节点定位,然后将 已定位节点升级为虚拟锚节点,完成剩余节点的定位 工作.该算法在位置覆盖、定位速度和功耗方面具有 一定优势,但是同样未说明信号重叠区域的目标节点 如何定位,同时升级节点的思想会产生一定的误差累 积,以及单AUV机制需要承担大量能耗,缩短了AUV 工作时间,不利于大规模网络作业.XUT等人[16]所 提算法同样基于六边形进行区域划分,该算法通过分 析距离因素解决了信号重叠区域节点定位问题.由于 六边形是二维图形,因此基于六边形分区仅适用于二 维场景,且与六边形同源的六棱柱是否适合三维网络 的区域划分问题,LIUL等人^[17]对其进行了研究:将 目标海域分成多个六面体,利用轨迹的垂直特性完成 所有目标节点定位.该算法与二维六边形分区思想同 源,能够很好地保证三维网络定位覆盖率,但遗憾的 是算法并未考虑由于信号重叠产生的能耗问题.

鉴于此,本文针对UASNs中稀疏网络定位问题, 提出一种AUV协同控制的TO模型区域划分定位算 法(aregion determination localization of TO-model, T-ORD),该算法使用结构和功能相同的2个AUV协同控 制完成定位. 第1个AUV依据所提出的TO模型完成区 域划分,并利用最小值判定法整合信号重叠区域内的 公共节点,即在子区域中心以广播的形式与目标节点 进行通信,接收到信息的目标节点反馈包含自身编号 的数据包,该AUV通过接收到目标节点的反馈信息, 确定该子区域(以TO模型中心为信号源所形成的球型 信号覆盖范围)存在的目标节点数量和身份信息,然后 向第2个AUV 发送子区域编号、目标节点编号和数量 等信息. 第2个AUV接收信息后移动到对应子区域完 成定位工作,并将定位的目标节点数量反馈给第1 个AUV,如果与第1个AUV识别的目标节点数量不一 致,则重新执行定位工作,如果一致,表示该子区域定 位工作完成,第2个AUV暂时进入睡眠状态,等待下一 次信号到达后被唤醒. TORD优势主要在于: 1) 目标 区域的完全划分,提高了定位覆盖率;2)最小值判定 法完成了公共节点的整合,避免了节点的重复定位, 减少了能量损耗; 3) 利用AUV协同机制减少了空闲状 态下AUV的能耗,并且为算法提供了执行结束的标 志、避免了定位时遗漏目标节点,进一步确保了定位 覆盖率; 4) 该协同机制分散了AUV的能耗, 而非让1 个设备承受全部能耗,有效延长了设备使用时间,增 加了AUV的生命周期,这在面对大规模网络时能够体 现出显著的优势,提高了算法的鲁棒性;5) 双AUV合 作机制实现了区域划分和定位工作同时进行,而非交 替进行,极大提高了工作效率.

2 模型设计

2.1 稀疏网络模型

假设在1000 m × 1000 m × 500 m的定位区域中 随机部署N个目标节点 P_i ($i = 1, 2, \dots, N$),所有节点 通信半径为R,节点间通过声波信号进行通信.如图1 所示,负责区域划分的AUV命名为AUV-V,负责定位 的AUV命名为AUV-F,图1体现了目标区域经AUV-V 一次遍历后的一层子区域及非空子区域的网络模型, 每个球体都是一个子区域,其中虚线球体表示空区域(没有目标节点的子区域),实线球体表示非空区域. AUV-V 遍历TO模型中心,并向AUV-F发送数据包,包括子区域以及目标节点编号和数量等信息,AUV-F 接收信息后被唤醒并前往相应子区域对目标节点进 行定位,1个子区域内目标节点定位完成后,向AUV-V 反馈定位信息,如信息一致,则该子区域定位工作结 束,并进入睡眠状态,等待下一次信号到达后再次被 唤醒,否则,重新进行定位工作.



2.2 TO模型

为减少AUV-V移动过程中发射信号次数,降低网络能源消耗,该领域很多研究者采用XUT等人^[16]提出的原则进行区域划分,本文将其扩展至三维环境: 1)模型堆砌后可将目标区域完全覆盖;2)模型体积最大限度接近球型体积.而在空间堆砌中,存在单一多面体堆砌和多种多面体混合堆砌两种方式,其中能够实现空间堆砌的单一多面体包含正方体、正六棱柱、正三棱柱和截角八面体,其他多面体完成堆砌则 需要多种多面体进行组合,但不仅多面体的范围难以确定,其组合方式也十分复杂^[19],由此本文研究单一 多面体堆砌问题.根据上述原则,区域划分模型基于能够单独完成堆砌的多面体选择,其中最接近球型体积和的是截角八面体模型(truncated octahedron, TO),下文对此展开论证.

定义1 体积系数λ指模型体积V与自身外接球体积之比,公式为

$$\lambda = \frac{3V}{4\pi R^3}.$$
 (1)

由定义(1)可见,体积系数λ越接近1,多面体体积 越接近其外接球体积,子区域间重叠区域越小.在此 给出引理1论证不同模型的体积系数.

引理1 设正方体 S^R ,正六棱柱 P_6^R ,正三棱柱 P_3^R 和截角八面体 T_8^R 的外接球半径与通信半径R相同,则体积系数分别为 $\lambda_{S^R}=2/(\sqrt{3}\pi), \lambda_{P_6^R}=6/(4\pi),$
$$\begin{split} \lambda_{P_3^R} = & 27\sqrt{7} / (49\pi), \ \lambda_{T_8^R} = & 24 / (5\sqrt{5}\pi), \ \boxplus \lambda_{T_8^R} > \lambda_{P_6^R} \\ &> \lambda_{S^R} > \lambda_{P_2^R}. \end{split}$$

证 根据假设,可得正方体 S^{R} 、正六棱柱 P_{6}^{R} 和正 三棱柱 P_{3}^{R} 体积为 $V_{S^{R}}=8\sqrt{3}/9\times R^{3}$, $V_{P_{6}^{R}}=12\sqrt{15}/25$ × R^{3} , $V_{P_{3}^{R}}=18\sqrt{7}/49\times R^{3}$,其中利用几何法计算截 角八面体体积 $V_{T_{8}^{R}}$.如图2所示,取截角八面体1/8区 域 $T_{1/8}^{R}$,并延长棱长,然后计算其体积 V_{ABCD} 和椎体角 的3个小锥体积 $V_{a_{i}b_{i}c_{i}}(i=1,2,3)$,二者相减计算出 $T_{1/8}^{R}$ 的体积 $V_{T_{1/8}^{R}}$,从而得到 $V_{T_{8}^{R}}$.

$$V_{T_8^R} = 4 \times \left[\sqrt{2}/2l + l_a\right]^3 / 3 - \sqrt{2}l^3, \tag{2}$$

其中: *l*为截角八面体边长, *l*_a为截角八面体中心至正 方形面的垂直距离.



Fig. 2 Local schematic diagram of model

因为 ΔDEb_3 和 ΔDa_3b_3 均为直角三角形,所以由 勾股定理可得截角八面体中心与各正方形面垂直距 离 l_a 、边长l和外R的关系式

$$L = \sqrt{2(R^2 - l_a^2)}.$$
 (3)

过四边形和六边形中心线, 截取截角八面体横截 面A-B-C-D-E-F, 如图3所示, α , β 为横截面对角线的 两个夹角.

由此可得

$$\begin{cases} \beta/2 = \sin^{-1}(\sqrt{3}\sigma), \\ \alpha/2 = \sin^{-1}\sigma, \\ \alpha/2 + \beta = \pi/2, \end{cases}$$
(4)

其中
$$\sigma = l/2\sqrt{R^2 - (l/2)}$$
.
由式(4)可得

$$f(\sigma) = 2\sin^{-1}(\sqrt{3}\sigma) + \sin^{-1}\sigma - \frac{\pi}{2}.$$
 (5)

将式(5)进行3阶泰勒展开可得 $f(\sigma)$ 存在1个实根 σ_1 和2个复数根 σ_2, σ_3 ,由盛金公式得

$$\sigma_1 = \frac{-\left(\sqrt[3]{g_1} + \sqrt[3]{g_2}\right)}{3(1/6 + 3\sqrt{3})} =$$

其中
$$g_1, g_2 = 3 \times (\frac{1}{6} + 3\sqrt{3}) \times \frac{-B \pm \sqrt{B^2 - 4AC}}{2}$$



图 3 横截面示意图

Fig. 3 Schematic diagram of cross section

由式(6)可得到T₈^R棱长l与其中心至各顶点距离 R的关系

$$l = \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{5}}R.$$
 (7)

由式(7)可得

$$I_a = \frac{2}{\sqrt{5}}R.$$
 (8)

由 式(2)、式(7)和 式(8)得 $V_{T_8^R}=32/5\sqrt{5}\times R^3$,代 入式(1)可以得到 $\lambda_{T_8^R}=24/(5\sqrt{5}\pi)$,即 $\lambda_{T_8^R}>\lambda_{P_6^R}>\lambda_{S^R}>\lambda_{P_3^R}$,因此截角八面体模型体积比相对最优. 证毕.

3 TORD算法

3.1 划分目标区域

为保证以最少子区域数量提供最大信号覆盖范围, 基于引理1,本文提出一种TO模型区域划分方式,进 而确定AUV-V的移动步长.

设半径为R的模型中心到其正六边形面垂直距离为*l*_b,由勾股定理可得

$$l_b = \frac{3}{\sqrt{15}}R.$$
 (9)

如图4所示,设相同颜色区域为同层次子区域,以 正方形面为接触面进行排列,模型间中心距离为2*l*_a; 不同颜色区域表示不同层子区域,以正六边形面为接 触面进行排列,模型间中心距离为2*l*_b.

假设 $(x_{u,w}^{\vartheta} y_{u,w}^{\vartheta} z_{u,w}^{\vartheta})^{\mathrm{T}}(\vartheta, u, w=1, 2, \cdots, n)$ 为 第 ϑ 层第u行第w列子区域中心的位置坐标,则层内子 区域中心坐标为

$$\begin{pmatrix} x_{u,w}^{\vartheta} \\ y_{u,w}^{\vartheta} \\ z_{u,w}^{\vartheta} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 2(u-1) l_a \\ 0 & 0 & 1 & 2(w-1) l_a \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_{1,1}^{\vartheta} \\ y_{1,1}^{\vartheta} \\ z_{1,1}^{\vartheta} \\ 1 \end{pmatrix},$$
(10)

其中: u指部署在y轴方向上第u个子区域, w指部署 在z轴方向上第w个子区域.



图 4 TO模型堆砌方式

Fig. 4 Stacking mode of TO-model

层间子区域中心坐标为

$$\begin{pmatrix} x_{1,1}^{\vartheta} \\ y_{1,1}^{\vartheta} \\ z_{1,1}^{\vartheta} \end{pmatrix}^{\mathrm{T}} = \begin{cases} (x_{1,1}^{1} + 2\lambda, y_{1,1}^{1}, z_{1,1}^{1}), & \vartheta/2 \neq 0, \\ (x_{1,1}^{1} + \lambda, y_{1,1}^{1} + \lambda, z_{1,1}^{1} + \lambda), & \vartheta/2 = 0, \end{cases}$$
 (11)

其中: $\lambda = (\vartheta - 1) l_a$, 且AUV-V取 $2 l_a \pi 2 l_b$ 作为层内与 层间步长.

所提出的区域划分方式在保证重叠区域最少的同时,完成了目标区域的全覆盖.因此,实现了在AUV-V 遍历过程中既降低了通信次数,也保证目标区域的信 号全覆盖,从而既控制了区域划分过程中的能量消耗, 也保证了良好的定位覆盖率.

3.2 整合公共节点

由于TO模型外接球半径取值为通信半径R,且 V_{Ts}^e小于其外接球体积,所以TO模型范围小于子区域 范围,因此,在以TO模型中心为信号源的球型区域中 可能发生信号重叠现象.又因节点分布具有随机性, 所以易导致在目标节点分区时产生歧义,现将信号发 生重叠的区域称为重叠区域,重叠区域内的目标节点 称为公共节点.为方便分析现给出以下定义:

定义 2 设*D*(*S*_{ID})为公共节点*P*距离子区域*S*_{ID} 中心的距离, *N*(*S*_{ID})为子区域*S*_{ID}内非公共节点的数 量, 定义*P*的校正值为

$$f_{\rm P}(S_{\rm ID}) = \frac{D(S_{\rm ID})}{N(S_{\rm ID})},\tag{12}$$

其中: $ID \in \{1, 2, \dots, snum\}$, snum为产生单个重叠 区域的相关子区域数量, 由此给出下面的校正规则:

规则1 若 S_i 的校正值小于 S_j 的校正值,则将P划 分至子区域 S_i ,若大于划分至 S_j ;

规则2 若校正值均相等,则将公共节点划分至其 中任意1个子区域.

由于存在2个及以上的子区域重叠导致出现重叠 区域,因此整合公共节点的方法更为复杂.为解决上 述问题,本文基于构建校正值公式,提出一种整合多 个子区域重叠所产生的公共节点的最小值判定法.该 算法首先测得公共节点与相关子区域中心点的距离, 再结合非公共节点数量,利用校正公式判定公共节点 所属子区域.在此给出定理1:

定理1 根据校正公式可将位于多个子区域重叠的重叠区域的公共节点划分至单个子区域.

证 如图5所示,设阴影部分为2个子区域重叠的 重叠区域,P为公共节点.首先计算P到子区域 S_i (*i*= 1,2)中心的距离 $D(S_i)$,然后AUV-V通过与节点通 信判断 S_i 中非公共节点的数量 $N(S_i)$;代入式(12) 得到 $f_P(S_i)$ 的值,如果满足 $f_P(S_j) = \min_{i=1}^2 f_P(S_i)$,则 将P划分至 S_j ,如果 $f_P(S_1) = f_P(S_2)$ 或者 $D(S_1) =$ $D(S_2) = 0$,则将P划分至 S_1 和 S_2 任意1个子区域.



假设阴影部分为 $k(k \leq \text{snum})$ 个子区域重叠的重

叠区域,计算P到子区域 $S_i(i = 1, 2, \dots, k)$ 中心的 距离 $D(S_i)$,然后判断 S_i 中非公共节点的数量 $N(S_i)$; 代入式(12)得到 $f_P(S_i)$,如果 $f_P(S_j)=\min_{i=1}^k f_P(S_i)$,则 将P划分至 S_j ,如果 $\forall i, j, i \neq j$, $(f_P(S_i) = f_P(S_j)) \lor$ $(D(S_i) = D(S_j) = 0)$,则将P划分至 S_i 任意1个子区 域即可. 证毕.

综上,依据校正公式可解决多个子区域重叠产生 的公共节点的区域划分问题.

针对无法直接判定公共节点所属子区域的问题, 提出最小值判定法,通过计算公共节点与子区域中心 的距离预计非公共节点数量完成公共节点的整合.即 首先计算D(S_ID)和N(S_ID)的值,代入式(12)计算 校正值f_P(S_ID),若子区域非公共节点数不为0,将P 划分至 $f_P(S_ID)$ 为最小值时所对应的子区域;若为0 或者各 $f_P(S_ID)$ 值相等,将P划分至任意相关子区域.

相比同类文献,最小值判定法不仅解决了多个子 区域重叠产生的公共节点区域划分问题^[18-21],而且能 够保证包含目标节点的子区域数量达到最低,进一步 控制了AUV-F定位时的能量消耗.

3.3 定位目标节点

AUV-F接收信号后移动到相应子区域,并随机布 放n个非共面的虚拟锚节点 q_j ($j = 1, 2, \dots, n$)与目 标节点 P_i 进行通信,然后计算 q_j 与 P_i 的距离 d_{ij} ,假设 P_i 坐标为(x_i, y_i, z_i), q_j 坐标为($x_j^{q_j}, y_j^{q_j}, z_j^{q_j}$),利用最 小二乘法解得 d_{ij} 为

$$\begin{cases} \sum_{k=x,y,z} \left(k_i - k_1^{q_j}\right)^2 = d_{i1}^2, \\ \vdots \\ \sum_{k=x,y,z} \left(k_i - k_n^{q_j}\right)^2 = d_{in}^2. \end{cases}$$
(13)

将式(13)整理成矩阵形式

$$A\eta = b, \tag{14}$$

其中: A, η, b表示

$$A = \begin{pmatrix} 2 (x_1^{q_j} - x_n^{q_j}) & \cdots & 2 (x_{n-1}^{q_j} - x_n^{q_j}) \\ 2 (y_1^{q_j} - y_n^{q_j}) & \cdots & 2 (y_{n-1}^{q_j} - y_n^{q_j}) \\ 2 (z_1^{q_j} - z_n^{q_j}) & \cdots & 2 (z_{n-1}^{q_j} - z_n^{q_j}) \end{pmatrix},$$
(15)

$$\eta = (x_i \ y_i \ z_i), \tag{16}$$

$$\left(\sum_{i=1}^{n} (k_1^{q_i^2} - k_n^{q_i^2}) + d_{in}^2 - d_{i1}^2 \right)$$

$$b = \begin{pmatrix} k = x, y, z \\ \vdots \\ \sum_{k = x, y, z} (k_{n-1}^{q_j 2} - k_n^{q_j 2}) + d_{in}^2 - d_{i(n-1)}^2 \end{pmatrix}.$$
(17)

通过式(17)计算出目标节点的位置为

$$\hat{\eta} = \left(A^{\mathrm{T}}A\right)^{-1}A^{\mathrm{T}}b. \tag{18}$$

由于定位环境为三维网络,则n取值下限为4,为 获得更合适的上限值,结合仿真试验进行说明.在表1 的参数设置下,本文利用MATLAB对子区域虚拟锚节 点数量进行了实验.为避免虚拟锚节点批量随机生成 导致实验结果失去参考价值,现采取逐步随机方式生 成虚拟锚节点进行仿真.

如图6所示,对500次结果取均值,随着子区域虚拟 锚节点数量n的增大,平均定位误差总体呈缓慢降低 趋势,当 $n \in [8,20]$ 时误差维持在0.125左右,因此本文 n取值范围在[8,20]可保证定位精度较高.为确定n的 最优值,本文对路径长度进行了仿真,由图6可知,n递 增时路径长度随之增加,当n > 12时,路径长度增加 程度明显.因此取 $n \in [8,12]$,既能保证路径长度较

短,也能维持较低的定位误差.



Table 1 Parameter setting of sub-regions





Fig. 6 Change of path length and localization error

3.4 TORD算法步骤

步骤1 基于所提出的TO模型根据式(10)和式 (11)完成区域划分.

步骤 2 利用最小值判定法整合公共节点.

步骤3 AUV-V遍历目标区域并记录每个子区 域编号以及目标节点编号和数量, AUV-F保持睡眠.

步骤 4 AUV-V逐步确定目标节点所属子区域,同时与AUV-F通信并将其唤醒.

步骤 5 AUV-F访问AUV-V筛选出的非空区域, 并产生虚拟锚节点与该子区域内目标节点进行通信.

步骤6利用最小二乘法计算该子区域内目标节点的位置.如果AUV-F定位的目标节点数量与AUV-V记录的数量一致,则进入睡眠状态并等待再次被唤醒,不一致则重新执行步骤6.

4 仿真结果与分析

在表2所示的参数设置下,本文利用MATLAB对 所提算法进行了仿真验证,并与稀疏环境下的SEA-L^[12], TSFL^[14], MPL^[18], BMAP^[20]和3D–MNRBSA– DV–HO–P^[21]的定位性能进行了比较.

本文依据HAN G等人^[22]提出的埃克曼分层模型, 将N个目标节点随机部署在1000 m×1000 m×500 m 的目标区域,将平均误差函数作为衡量标准

$$e = \frac{\sum_{j=1}^{M} \sum_{i=1}^{N_{\text{localized}}^{i}} \sqrt{(x_t - x_r)^2 + (y_t - y_r)^2 + (z_t - z_r)^2}}{N_{\text{localized}}^i \times R \times M}, \quad (19)$$

其中: M为仿真次数, $N^i_{\text{localized}}$ 为第i次仿真完成定位 的节点数, (x_t, y_t, z_t) 为目标节点估计位置, (x_r, y_r, z_r) 为目标节点实际位置.

表 2 目标区域参数设置

Table 2 Parameter setting of target region

仿真参数	取值
仿真区域/m ³	$1000\times1000\times500$
子区域虚拟锚节点数量/个	8
通信半径/m	100 - 700
仿真次数/次	500

依据ZHANG Qiang等人^[23]提出的定义作为定位 覆盖率衡量标准,表示为

Localization coverage=
$$\frac{1}{M} \sum_{i=1}^{M} \frac{N_{\text{localized}}^i}{N_{\text{total}}},$$
 (20)

其中 N_{total} 为总节点数目.

4.1 通信半径对定位覆盖率的影响

图7给出了TORD算法定位覆盖率随通信半径的 变化,由图7可知,虚拟锚节点数量n随通信半径R的 增大而降低,但二者均对定位覆盖率影响较小.因 为R的改变减少了子区域的数量,从而n的值随之减 小,但依据所提出的区域划分方式,依然能够保证目 标区域的信号覆盖,进而保证了较高的定位覆盖率. 同时,由图7可以看出,随着通信半径的增长,MPL算 法和TORD算法定位覆盖率均较为稳定,但前者覆盖 率相对偏低,而TSFL算法在通信半径增大到约400 m 时覆盖率较高并趋于稳定,因此,TORD算法在定位覆 盖率方面的优势更加突出.

4.2 通信半径对模糊节点数量和处理率的影响

由于公共节点的整合结果对定位影响较大,因此 现对本文提出的最小值判定法的有效性进行验证,并 提出以下定义:

定义3 设产生的公共节点数量为N^{fu}, 被处理 公共节点数量为N^{cfu}, 则处理率Cop 为

$$\operatorname{Cop} = \frac{N^{\operatorname{cfu}}}{N^{\operatorname{fu}}}.$$
(21)

图8为网络区域范围为1000 m, 计算公共节点数 量和处理率Cop随通信半径变化而改变的结果图. 从 图8可以看出, 在目标区域环境一定的情况下, 当通信 半径*R* ≤ 300 m时, 公共节点数量相对较少. 根据最 小值判定法对其进行二次划分, 随着公共节点数量不 断增加, Cop依然保持稳定且处理效果显著.



图 7 不同通信半径下虚拟锚节点数目和定位覆盖率





Fig. 8 Changes in the number of fuzzy nodes and processing rate

4.3 不同网络区域范围下虚拟锚节点数量的比较

图9为当通信半径R的取值定为300 m时, 3D-MN-RBSA-DV-HOP、BMAP 和TORD 关于虚拟锚节点个数与网络区域范围关系对比图.如图9所示,随着网络区域范围的增加,子区域数量会随之增加,进而虚拟锚节点数量呈上升趋势.相比BMAP算法,TORD算法的虚拟锚节点数量平均降低了54%,最高可达68.8%,与3D-MNRBSA-DV-HOP算法相比,网络区域范围大于720 m时,TORD算法虚拟锚节点数量平均降低10.4%,最高可达20%,且与上述两种算法相比,在网络区域范围为1000 m时,TORD算法虚拟锚节点数量较低,因此算法能耗较低.

4.4 不同网络区域范围下定位误差的比较

如图10所示,当通信半径R取300m、网络区域范围从400m至1000m变化时,TORD算法的定位误差始终低于其他3种算法,并且TORD算法误差变化趋势呈稳定状态,因此算法鲁棒性强.

5 结论

本文针对UASNs动态变化易形成稀疏型低覆盖定 位问题,提出AUV协同控制的TO模型区域划分定位 算法.该算法首先从理论上证明了TO模型满足三维 区域划分原则并且其体积比相对最优,设计了最优区 域划分方式,并提出最小值判定法解决公共节点区域 划分问题;然后提出AUV协同策略完成定位.理论分 析和仿真表明,与同类算法相比,在不同网络范围和通 信半径标准下,所提算法能更好地适用于稀疏网络环 境,保证了定位精度的同时有效提高了网络定位覆盖 率和鲁棒性.同时,算法使用AUV协同机制可实现区 域划分与定位工作同步执行,并且AUV-F只需关注非 空区域即可,从而缩短了算法执行时间,减少了能量 消耗,延长了设备使用寿命.此外,AUV移动轨迹是决 定定位精度和能耗的重要因素,未来将对轨迹优化作 进一步研究.



图 9 不同区域范围下虚拟锚节点数量对比图

Fig. 9 Comparison of the number of virtual anchor nodes in different regions



Fig. 10 Comparison of localization errors in different regions

参考文献:

 HAO Shiya, YANG Yuanyuan, DONG Yijing, et al. Particle swarm and monte carlo optimized mobile localization algorithm in underwa(郝诗雅,杨媛媛,董怡靖,等.水声传感器网络中粒子群与蒙特卡罗优化的移动定位算法.电子学报,2021,49(2):292-299.)

- [2] FANG Kai, YAO Jiaqi, LI Jiawang. Three-dimensional simultaneous tracking and stabilization of under-actuated autonomous underwater vehicles based on neural network. *Control Theory & Applications*, 2021, 38(6): 731 738.
 (方凯, 姚佳琪, 李家旺. 基于神经网络的欠驱动水下机器人三维同步跟踪和镇定控制. 控制理论与应用, 2021, 38(6): 731 738.)
- [3] CHENG Jie, DONG Yunling, CHEN Jiaxing, et al. An improved three-dimensional DV-Hop algorithm with continuous hop value. *Acta Electronica Sinica*, 2020, 48(11): 2122 2130.
 (程杰, 董云玲, 陈嘉兴, 等. 一种具有连续跳数值的三维DV-Hop改进算法. 电子学报, 2020, 48(11): 2122 2130.)
- [4] SU X, ULLAH I, LIU X, et al. A review of underwater localization techniques, algorithms, and challenges. *Journal of Sensors*, 2020, 2020(4):1 – 24.
- [5] GUO J, LI D, HE B. Intelligent collaborative navigation and control for AUV tracking. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2021, 17(3): 1732 – 1741.
- [6] HAN G, GONG A, WANG H, et al. Multi-AUV collaborative data collection algorithm based on q-learning in underwater acoustic sensor networks. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2021. 70(9): 9294 – 9305.
- [7] ZHU Daqi, LIU Yu, SUN Bing, et al. Autonomous underwater vehicles path planning based on autonomous inspired glasius bio-inspired neural network algorithm. *Control Theory & Applications*, 2019, 36(2): 183-191.
 (朱大奇,刘雨,孙兵,等. 自治水下机器人的自主启发式生物启发神

经网络路径规划算法. 控制理论与应用, 2019, 36(2): 183 – 191.)

- [8] LI Y, WANG Y, YU W, et al. Multiple autonomous underwater vehicle cooperative localization in anchor-free environments. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 2019, 44(4): 895 – 911.
- [9] LU Long. Research on path planning of mobile nodes with fan contraction in halin graph based on regular hexagonal mesh. Shanxi: Taiyuan University of Science and Technology, 2018.
 (卢龙. 基于正六边形网格划分的Halin图扇收缩移动节点路径规划 研究. 山西:太原科技大学, 2018.)
- [10] LIN Y, TAO H, TU Y, et al. A node self-localization algorithm with a mobile anchor node in underwater acoustic sensor networks. *IEEE Access*, 2019, 7(7): 43773 – 43780.
- [11] JIANG Junzheng, LI Yangjian, ZHAO Haibing, et al. A distributed localization algorithm for large-scale sensor networks. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2019, 41(12): 3022 3028.
 (蒋俊正, 李杨剑, 赵海兵, 等. 一种大规模传感器网络节点分布式定位算法. 电子与信息学报, 2019, 41(12): 3022 3028.)
- [12] OJHA T, MISRA S, OBAIDAT M S. SEAL: Self-adaptive AUVbased localization for sparsely deployed underwater sensor networks. *Computer Communications*, 2020, 154(3): 204 – 215.
- [13] LIU P. Spark-based parallel genetic algorithm for simulating a solution of optimal deployment of an underwater sensor network. *Sensors*, 2019, 19(12): 2717 – 2734.

- [14] SU Y, GUO L, JIN Z, et al. A mobile-beacon-based iterative localization mechanism in large-scale underwater acoustic sensor networks. *IEEE Internet of Things Journal*, 2021, 8(5): 3653 – 3664.
- [15] SONG L, ZHU J, ZHANG P. Node localization algorithm based on mobile anchor in wireless sensor networks. *Information Technology*, 2017, 11(12): 2637 – 2643.
- [16] XU T. A localization algorithm using a mobile anchor node based on region determination in underwater wireless sensor networks. *Journal* of Ocean University of China, 2019, 18(2): 138 – 146.
- [17] LIU L, ZHANG H, GENG X, et al. Hexahedral localization (HL): A three-dimensional hexahedron localization based on mobile beacons. *The Scientific World Journal*, 2013, 21(11): 965138.
- [18] ZHANG W, HAN G, WANG X, et al. A node location algorithm based on node movement prediction in underwater acoustic sensor networks. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2020, 69(3): 3166 – 3178.
- [19] THOMSON W, WILLIAM S. On the division of space with minimum partition area. *Philosophical Magazine*, 1887, 24(1): 503 – 514.
- [20] WANG Xin, TIAN Yi, JIANG Hua, et al. Location algorithm based on dynamic path planning of mobile anchor nodes. *Computer Engineering and Design*, 2020, 41(8): 2135 – 2140.
 (王鑫,田艺,蒋华,等.基于移动储节点移动路径动态规划的定位算 法. 计算机工程与设计, 2020, 41(8): 2135 – 2140.)
- [21] ZHANG Haiyan. Research on three-dimensional localization algorithm of bird swarm optimization based on mobile anchor node. Shanghai: Shanghai Normal University, 2020.
 (张海艳. 基于移动锚节点的鸟群优化三维定位算法研究. 上海: 上海师范大学, 2020.)
- [22] HAN G, SHEN S, SONG H, et al. A stratification-based data collection scheme in underwater acoustic sensor networks. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2018, 67(11): 10671 – 10682.
- [23] ZHANG Qiang. Key technologies of node location and target tracking in underwater wireless sensor networks. Zhejiang: Zhejiang University, 2016.
 (张强.水下无线传感器网络节点定位与目标跟踪关键技术.浙江: 浙江大学, 2016.)

作者简介:

陈嘉兴 教授,博士生导师,目前研究方向为水下信息物理系统理 论研究、水声通信技术、感知融合下的水下协同控制等,E-mail: 139 30194955@163.com;

董怡靖 硕士研究生,目前研究方向为水声传感器网络协同定位 与自主水下机器人协同控制, E-mail: j985535689@163.com;

赵晓旭硕士研究生,目前研究方向为水声传感器网络协同定位, E-mail: zhaoxiaoxu035@126.com;

刘志华 教授,硕士生导师,目前研究方向为水声传感器网络协同 定位与追踪、水下机器人航迹规划、自主水下机器人协同控制等, E-mail: hebtuliuzhihua@163.com;

刘 扬 硕士研究生,目前研究方向为水声传感器网络协同定位, E-mail: Yang-Liu992021@163.com.