

# 基于骨架提取的水下传感器网络刚性定位判别研究

夏 娜<sup>1)</sup> 王诗良<sup>1)</sup> 郑 榕<sup>2)</sup> 杜华争<sup>1)</sup> 徐朝农<sup>3)</sup>

<sup>1)</sup>(合肥工业大学计算机与信息学院 合肥 230009)

<sup>2)</sup>(麦克马斯特大学计算与软件学院 汉密尔顿 加拿大 L8S4K1)

<sup>3)</sup>(中国石油大学计算机科学与技术系 北京 102249)

**摘 要** 水下传感器网络可用于海洋资源勘测、污染监测和战术监视等领域,已成为无线传感器网络方向的研究热点.在水下三维空间中如何对位置未知的节点进行可定位性判别,并实施有效定位,从而为水下监测应用提供位置信息是一个基础的关键问题.该文引入刚性图理论,提出了一种基于骨架提取的水下传感器网络刚性定位判别方法.该方法首先将水下传感器网络构建为无向图,然后通过“伪节点剔除”和“割边剔除”等策略提取具有全局刚性的子图,即网络的骨架,从而完成网络及节点可定位性的判别,最后利用层次分析法对可定位节点进行“定位可信度”综合排序,为定位计算提供指导和依据.大量仿真实验结果表明该方法在不同网络规模、节点密度和网络连通性情况下均具有较高的判别成功率和有效性.

**关键词** 水下传感器网络;可定位性;骨架提取;刚性图理论;层次分析法

**中图法分类号** TP18; TP393 **DOI号** 10.3724/SP.J.1016.2015.00589

## Study on Localizability Judgment in Underwater Sensor Networks Based on Skeleton Extraction and Rigidity Theory

XIA Na<sup>1)</sup> WANG Shi-Liang<sup>1)</sup> ZHENG Rong<sup>2)</sup> DU Hua-Zheng<sup>1)</sup> XU Chao-Nong<sup>3)</sup>

<sup>1)</sup>(School of Computer and Information, Hefei University of Technology, Hefei 230009)

<sup>2)</sup>(Department of Computing and Software, McMaster University, Hamilton L8S4K1, Canada)

<sup>3)</sup>(Department of Computer Science and Technology, China University of Petroleum, Beijing 102249)

**Abstract** Underwater sensor networks (UWSNs) can be applied in sea resources reconnaissance, pollution monitoring and tactical monitoring etc., and it has become a hot field in wireless sensor networks. In the three dimensional underwater space, it is a key topic to judge the localizability of the unknown sensor node in all kinds of applications. In this paper, a localizability judgment method for UWSNs is proposed based on skeleton extraction and Rigidity Theory. Firstly, UWSNs is converted to an undirected graph. Secondly, by eliminating its pseudo node and cutting edge, the graph will shrink to the sub-graph with global rigidity, which is named “network skeleton”, and then the localizable nodes are figured out. Lastly, Analytic Hierarchy Process is used to evaluate the localization credibility of the localizable nodes. The extensive simulations demonstrate that the proposed localizability judgment method can achieve excellent success ratio and efficiency in the networks with different sensor numbers, sensor density and connectivity.

**Keywords** underwater sensor networks (UWSNs); localizability; skeleton extraction; rigidity theory; analytic hierarchy process

收稿日期:2013-11-30;最终修改稿收到日期:2014-05-01. 本课题得到国家自然科学基金(61100211,61003307)、教育部新世纪优秀人才支持计划(NCET-13-0768)、安徽省杰出青年科学基金(1408085J05)资助. 夏 娜,男,1979年生,博士,教授,中国计算机学会(CCF)会员,主要研究领域为水下传感器网络、导航信息处理、计算智能与应用. E-mail: xiananawo@hfut.edu.cn. 王诗良,男,1988年生,硕士研究生,主要研究方向为水下传感器网络. 郑 榕,女,1975年生,博士,副教授,主要研究方向为网络监测和诊断、序列学习. 杜华争,女,1986年生,博士研究生,主要研究方向为水下传感器网络、计算智能. 徐朝农,男,1977年生,博士,副教授,主要研究方向为自组织无线网络、嵌入式系统.

## 1 引言

海洋是人类维持生存和社会可持续发展的重要资源,开发利用海洋的热潮正在全球兴起<sup>[1-2]</sup>.近几年我国开始加强科技进步对海洋经济发展的带动作用,加快海洋科技创新体系的建设,着力海洋资源勘测与利用关键技术的研究开发.

水下传感器网络(UnderWater Sensor Networks, UWSNs)是由具有声学通信与计算能力的传感器节点构成的水下监测网络系统.由于可以广泛应用于海洋资源勘测、污染监测、辅助导航和战术监视等领域,UWSNs已引起各国政府和研究机构的关注,成为当前研究热点之一<sup>①②</sup>.近年来,水下传感器网络的研究主要包括水下通信技术<sup>[3-4]</sup>、布置和组网<sup>[5-6]</sup>、路由协议<sup>[7-8]</sup>、定位跟踪<sup>[9-11]</sup>和安全<sup>[12]</sup>等方面.

由于在 UWSNs 的各种应用中,只有当水下传感器节点的位置已知,其采集的信息才具有意义,同时,节点的位置信息也是网络拓扑控制、覆盖控制和路由决策等的依据,因此水下传感器节点的定位(Sensor localization)具有重要的研究意义.

水下传感器节点定位与陆地传感器节点定位相比具有特殊性:水下三维(3D)特性使得节点定位求解更复杂,难度更大;节点之间采用声学通信,信号衰减模型与水下介质相关.因此如何在三维空间中利用传感器节点之间的声学通信,由位置已知的锚节点对位置未知的普通节点进行定位,从而为水下监测网络提供位置信息是一个重要课题.

目前,水下传感器节点定位理论与技术的研究主要分为“节点定位计算”和“节点可定位性判别”两大类.由于后者可以为前者提供指导和依据,提高节点定位计算的效率,因此它是实现水下传感器节点定位的关键.本文重点研究水下传感器节点可定位性判别问题.

本文第 2 节对近年来的相关研究工作进行分析总结;第 3 节提出基于骨架提取的水下传感器节点刚性定位判别方法;第 4 节通过大量的仿真实验证明方法的正确性和有效性;第 5 节总结全文.

## 2 相关工作分析

在陆地传感器网络中,传感器节点定位一直是基础性研究问题,相关成果丰富,但是由于水下传感

器节点定位的特殊性,上述成果无法直接应用于水下.目前,水下传感器网络节点定位技术从陆地技术派生而来,发展为 3 类:基于测距的定位方法、基于非测距的定位方法以及节点可定位性判别方法.

### (1) 基于测距的定位方法

该方法通过测距技术获得节点间的距离或角度,然后利用几何关系计算出未知节点的坐标.测距技术主要分为 4 种:接收信号强度(RSSI)、到达时间(TOA)、到达时间差(TDOA)以及到达角度(AOA).在水下传感器网络中,基于测距的定位方法主要有 3 种策略:① 四边定位法<sup>[13]</sup>.它是将陆地传感器网络的三边定位法推广到三维空间的一种方法.通过测量未知节点与 4 个锚节点之间的距离,结合锚节点的位置信息,计算出未知节点的坐标(如图 1).在此基础上,文献[14]提出了一种大规模水下传感器网络定位方法(Localization Scheme for Large Scale,LSLS).它将依据锚节点定位出的节点作为新的锚节点,继续采用四边定位法对其他未知节点完成定位;② 投影定位机制<sup>[10]</sup>.该方法将锚节点投影到未知节点所在的平面,将三维定位问题转化为二维定位问题来求解;③ 自主水下航行器(Autonomous Underwater Vehicle, AUV)辅助定位法.文献[15]提出:通过 AUV 周期浮出水面,利用 GPS 获得坐标信息,借助罗盘推理期间的航行位置并广播消息,协助沿途的未知节点进行测距和定位.该方法实施较复杂,定位时延长.

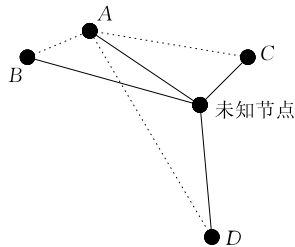


图 1 四边定位法示意图

### (2) 基于非测距的定位方法

该方法不需要测量节点间的距离或角度,仅根据网络的连通性、节点间的路由跳数以及锚节点的坐标,即可估计出未知节点的粗略位置.属于此类的方法主要有交叠区域定位法<sup>[16]</sup>、质心定位法<sup>[17]</sup>、多跳距离定位法<sup>[18]</sup>以及 AUV 辅助定位法<sup>[19]</sup>.由于水

① Underwater Sensor Networks Lab. [EB/OL]. <http://uwsn.engr.uconn.edu/usefullinks.html>, 2010

② UWSAN at Georgia Tech. [EB/OL]. <http://www.ece.gatech.edu/research/labs/bwn/UWASN>, 2010

下传感器网络的三维特性, 此类方法的定位可信度比它在陆地传感器网络中的定位可信度差。

### (3) 节点可定位性判别方法

在进行定位计算之前, 判别无线传感器网络以及其中节点的可定位性, 具有重要的指导意义。近年来, 刚性图理论(Rigidity Theory)已成为判别无线传感器网络可定位性的主要方法之一。

2004年, Eren等人<sup>[20]</sup>首次引入刚性图理论进行研究, 并提出“当且仅当网络的基础图为全局刚性时, 网络是唯一可定位的”。文献[21-22]证明了上述观点。文献[23-24]详细阐述了刚性图理论, 并系统地总结了无线传感器网络中基于刚性图理论的定位方法。但是这些研究都是针对陆地传感器网络的整体可定位性进行判断。2005年, Goldenberg等人<sup>[25]</sup>指出了节点的可定位性, 提出了节点可定位的必要条件: 节点到3个锚节点必须有3条独立的路径, 简称3P(Three Paths); 同时给出了充分条件: 节点位于一个含有3个不共线锚节点的全局刚性图中, 简称RRT-3B<sup>①</sup>。2012年, Yang等人<sup>[26]</sup>在上述研究的基础上, 更新了节点可定位的必要条件: 节点满足3P条件, 且位于锚节点所在的冗余刚性图中; 给出了一个更弱的充分条件: 节点位于至少含有3个锚节点的冗余刚性图中, 且在该图中节点到3个锚节点存在3条独立的路径。2012年, Zhang等人<sup>[27]</sup>分析了无线传感器网络的可定位性, 并系统地总结了网络整体和节点个体的可定位条件。

上述基于刚性图理论的传感器网络可定位性判别都是针对陆地传感器网络(二维)。目前, 将刚性图理论应用于水下传感器网络(三维)的研究甚少, 理论方法体系尚不完善。

另外, 现有的可定位性判别主要针对网络整体或节点个体。对于一个庞大的传感器网络, 若对其整体进行可定位性判断, 结论通常是整体不可定位, 但这不能否定网络局部具有刚性(可定位性), 如果能够剥离出具有刚性的网络局部区域, 那么其中的节点很有可能具有可定位性。这也减少了对节点个体逐一进行可定位性判断的工作量。

因此, 本文提出一种基于骨架提取的水下传感器网络刚性定位判别方法。该方法逐步提取水下传感器网络的拓扑子集, 并利用刚性图理论判断其全局刚性, 找到具有全局刚性的最大网络子集(骨架), 从而完成网络及节点的可定位性判别; 随后利用层次分析法对骨架上的节点进行定位可信度综合排序, 为定位计算提供指导和依据。

## 3 基于骨架提取的 UWSNs 刚性定位判别

### 3.1 问题描述

在水下三维监测区域内, 随机撒布了  $n$  个锚节点  $a_1, a_2, \dots, a_n$  和  $m$  个普通节点  $s_1, s_2, \dots, s_m$ 。它们具有相同的通信半径  $r^c$ 。锚节点  $a_i (i=1, \dots, n)$  的位置  $\mathbf{p}_i^a$  已知; 普通节点  $s_j (j=1, \dots, m)$  的位置  $\mathbf{p}_j^s$  未知。

水下传感器网络可以用无向图  $G=(V, E)$  表示, 如图2所示。在  $G$  中, 所有顶点的集合即为传感器节点集  $V=\{a_1, a_2, \dots, a_n, s_1, s_2, \dots, s_m\}$ 。若任意两个节点可直接通信, 即它们之间的欧式距离  $d_{ij} \leq r^c$ , 则它们之间存在一条边, 用  $e_{ij}$  表示;  $E$  为网络中所有边的集合。

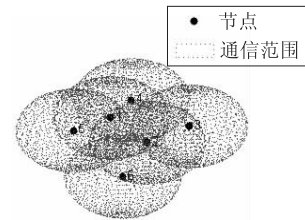
$$E = E_{aa} \cup E_{ss} \cup E_{as},$$

$$E_{aa} = \{e_{ij} = (a_i, a_j) : d_{ij} = \|\mathbf{p}_i^a - \mathbf{p}_j^a\| \leq r^c\},$$

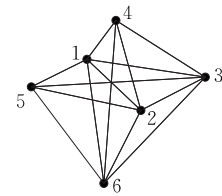
$$E_{ss} = \{e_{ij} = (s_i, s_j) : d_{ij} = \|\mathbf{p}_i^s - \mathbf{p}_j^s\| \leq r^c\},$$

$$E_{as} = \{e_{ij} = (a_i, s_j) : d_{ij} = \|\mathbf{p}_i^a - \mathbf{p}_j^s\| \leq r^c\}.$$

$E_{aa}$ 、 $E_{ss}$ 、 $E_{as}$  分别为锚节点间、普通节点间以及锚节点和普通节点间的边集合。



(a) 随机部署的水下传感器网络



(b) 无向图G

图2 水下传感器网络无向图G

因此, 水下传感器网络节点可定位性判别问题就是在已知顶点  $a_1, a_2, \dots, a_n$  位置的无向图  $G$  中, 根据边集合  $E$  的信息, 判断顶点  $s_1, s_2, \dots, s_m$  中哪些顶点是可定位的。

### 3.2 刚性图理论

刚性理论起源于 Euler 对于多面体的猜想; Asimow 等人<sup>[28-30]</sup>将其扩展到刚性图的研究; 在传

① RRT-3B: Redundantly Rigid, Triconnected and 3 Beacons

传感器网络领域,刚性图理论已被应用于解决陆地传感器网络(二维)中节点可定位性判别问题,取得了较好的效果<sup>[31-33]</sup>.

实现:无向图  $G=(V, E)$  由顶点集合  $V$  和边集合  $E$  构成. 将  $G$  映射到  $R^d$  空间,任意一个顶点  $i \in V$  的位置  $\mathbf{p}_i \in R^d$ ;任意一条边  $e_{ij} \in E$ ,其边长为  $d_{ij}$ ,如果一一映射  $p: V \rightarrow R^d$  满足  $d_{ij} = \|\mathbf{p}_i - \mathbf{p}_j\|$ ,则称  $p$  为  $G$  的一个实现.

框架:无向图  $G$  和它的一个实现  $p$  共同构成一个框架,记为  $(G, p)$ .

假设另一框架  $(G, q)$ ,其顶点的位置  $\mathbf{q}_i \in R^d$ . 如果任意  $e_{ij} \in E$  满足  $\|\mathbf{p}_i - \mathbf{p}_j\| = \|\mathbf{q}_i - \mathbf{q}_j\|$ ,则称框架  $(G, p)$  和  $(G, q)$  等价. 如果任意一个顶点对  $(i, j)$ ,无论是否存在  $e_{ij} \in E$ ,都满足  $\|\mathbf{p}_i - \mathbf{p}_j\| = \|\mathbf{q}_i - \mathbf{q}_j\|$ ,则称框架  $(G, p)$  和  $(G, q)$  全等. 全等框架是等价框架的一种特殊情况. 显然,如果两个框架全等,则它们只有通过整体平移、旋转和镜像对称 3 种运动才可以完全重合在一起.

刚性:对于与框架  $(G, p)$  等价的  $(G, q)$ ,如果存在一个足够小的正数  $\epsilon$ ,使得所有的顶点  $i \in V$  都满足  $\|\mathbf{p}_i - \mathbf{q}_i\| < \epsilon$ ,那么  $(G, p)$  和  $(G, q)$  全等,则称  $G$  是刚性的(Rigid).

全局刚性:如果所有与  $(G, p)$  等价的框架,同时也与  $(G, p)$  全等,则称  $G$  是全局刚性的(Globally Rigid).

图 3 为刚性和全局刚性在二维平面上实例. 在图 3(a)中,顶点 4 和 5 在保持与邻居顶点距离不变的情况下,其位置可以发生连续变化;变化前后的框架等价但是不全等. 因此,图 3(a)是非刚性的. 图 3(b)不能做连续形变,但存在局部翻转或折叠后的框架,如图 3(c),这两个框架不全等,因此它们只是刚性的. 图 3(d)不能做任何形变,即任何与之等价的框架也与之全等,因此它是全局刚性的.

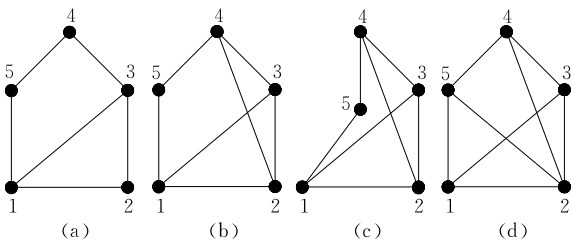


图 3 刚性和全局刚性图实例

可见,全局刚性的条件比刚性要严格得多. 全局刚性图对应的框架不仅不能发生任何连续形变,而且不能发生任何局部翻转或折叠,只能进行整体平移或旋转.

已有研究将陆地传感器网络表示为无向图  $G=(V, E)$ ,将传感器节点对应为图中的顶点,将节点间的连接关系对应为图中的边,进而得出了一些关于传感器网络可定位性的结论.

**定理 1.** 设一个网络分布在  $d(d=2, 3)$  维空间中,用无向图  $G$  表示. 该网络含有  $n$  个锚节点,  $m$  个普通节点. 网络中至少含有  $d+1$  个锚节点,且非线性分布,那么网络可定位当且仅当图  $G$  是全局刚性的<sup>[20]</sup>.

这样,网络可定位问题就转化为基于边约束的图的全局刚性判断问题.

判断一个图的刚性和全局刚性是一个 NP-Hard 问题. 目前,图的刚性判断有 Laman 条件<sup>[22]</sup>和刚性矩阵(Rigidity Matrix)方法<sup>[5]</sup>;而图的全局刚性判断要复杂和困难得多,以下将介绍一些判断方法和结论.

$k$ -连通:给定图  $G=(V, E)$ ,如果任意删除少于  $k$  个顶点及其附带的边,图  $G$  仍然是连通图<sup>①</sup>,但删除某  $k$  个顶点,图  $G$  就丧失了连通性,则称图  $G$  是  $k$ -连通的.

冗余刚性:如果图  $G=(V, E)$  去掉任意一条边后仍保持刚性,则称  $G$  是冗余刚性的.

**定理 2.** 在二维空间中,给定图  $G=(V, E)$ ,并且  $|V| > 3$ ,则  $G$  为全局刚性的充分必要条件是  $G$  具有 3-连通性和冗余刚性.

**定理 3.** 在  $d(d \geq 3)$  维空间中,给定图  $G=(V, E)$ ,并且  $|V| > d+1$ ,如果图  $G$  是全局刚性的,则  $G$  具有  $d+1$ -连通和冗余刚性. 但该定理的逆命题不成立<sup>[34]</sup>.

压力矩阵:给定图  $G=(V, E)$ ,  $E(i)$  为与顶点  $i$  关联的边集合. 对于每一个顶点  $i \in V$ ,若满足  $\sum_{j: (i, j) \in E(i)} \omega_{ij} (\mathbf{p}_i - \mathbf{p}_j) = 0$ ,则称  $\boldsymbol{\omega} = (\dots, \omega_{ij}, \dots)$  为图  $G$  的均衡压力. 根据  $\boldsymbol{\omega}$ ,可得到  $|V| \times |V|$  阶对称矩阵  $\mathbf{S} = [s_{ij}]$ ,该矩阵即为图  $G$  的压力矩阵,其中

$$s_{ij} = \begin{cases} -\omega_{ij}, & e_{ij} \in E \\ 0, & e_{ij} \notin E \text{ 并且 } i \neq j \\ \sum_{k: e_{ik} \in E} \omega_{ik}, & i = j \end{cases} \quad (1)$$

**定理 4.** 在  $d(d \geq 3)$  维空间中,给定图  $G=(V, E)$ ,并且  $|V| > d+1$ ,当压力矩阵的秩为  $|V| - (d+1)$  时,则图  $G$  为全局刚性<sup>[35]</sup>.

该定理为水下传感器网络(三维)可定位性的判别提供了方法依据.

① 在图  $G$  中任意两个顶点之间存在至少一条由边组成的路径.

### 3.3 骨架提取的 UWSNs 刚性定位判别方法

水下传感器网络(UWSNs)节点可定位性判别问题就是在已知顶点  $a_1, a_2, \dots, a_n$  位置的无向图  $G$  中, 根据边集合  $E$  的信息, 判断顶点  $s_1, s_2, \dots, s_m$  中, 哪些顶点是可定位的。

依据 3.2 节中的相关定理, 对图  $G$ (水下传感器网络)的全局刚性进行判断, 结论通常是整体不是全局刚性的(网络整体是不可定位的), 但这不能否定图  $G$  的局部具有刚性(可定位性), 因此本文提出一种基于骨架提取的水下传感器网络刚性定位判别方法。该方法分为两个步骤:(1) 利用水声能量衰减模型计算可相互通信的节点间的距离, 构建出水下传感器网络无向图  $G=(V, E)$ ;(2) 按照骨架提取策略, 逐步提取无向图  $G$  的子图, 并利用刚性图理论判断其全局刚性, 找到具有全局刚性的最大子图(骨架), 从而找出网络中可定位的节点。

#### 3.3.1 UWSNs 无向图的构建

水下无线传感器网络无向图的构建, 关键是获取可直接通信的节点对, 以及它们的欧式距离, 从而得到边集合  $E$ 。

可直接通信的节点间的欧式距离可利用水声信号在水中传播的损耗模型计算求得。文献[36]将水声信号在水中传播的损耗分为球状扩展损失和衰减损失两部分:

$$Loss = 20\lg R + \alpha R \times 10^{-3} \quad (2)$$

其中,  $Loss$  是水声信号传输的损耗能量/dB;  $R$  为发射节点与接收节点之间的距离/m;  $\alpha$  是与信号频率  $f$  相关的吸收因子/(dB/km)。该模型表明水声信号传播时的能量衰减主要取决于传输距离和传输介质对频率的吸收。

$Loss$  可以由发射节点联合接收节点获取;  $\alpha$  可采用 Thorp 模型<sup>[37]</sup> 依据频率  $f$  计算得到。因此, 通过求解式(2)可以得到节点间的距离  $R$ 。由于式(2)为含有对数的超越方程, 因此可以采用 Lambert W 函数<sup>[38]</sup> 加以求解, 具体求解过程见本课题组早期研究工作<sup>①</sup>。

本文设计了以下传感器节点通信协议以汇聚感知数据至基站, 由基站构建 UWSNs 无向图。

(1) 节点周期性广播探测消息 TestMessage, 用二元组  $(ID_{\text{test}}, TSS)$  表示,  $ID_{\text{test}}$  为节点  $ID$  号,  $TSS$  为发射功率;

(2) 节点收到 TestMessage, 测量接收信号强度 RSS, 建立上报消息 ReportMessage, 用四元组  $(ID_{\text{test}}, ID_{\text{rec}}, TSS, RSS)$  表示, 并以基站为目的地址进行数据路由;

(3) 基站接收各个节点发来的 ReportMessage, 进行数据融合, 得到网络中节点间的连接关系, 并利用水声信号损耗模型计算节点间的距离, 得到边集合  $E$ , 从而构建出边约束的无向图  $G=(V, E)$ 。

#### 3.3.2 骨架提取策略

骨架提取是一种图形图像处理方法。图像骨架是图像内部各个最大内切球中心的集合, 它由一些顶点和连线组成。骨架展现了一个图像的尺寸和形状, 因此骨架提取已成为图像识别和分析的重要手段<sup>[39-40]</sup>。由于骨架很好的保留了目标的形态和拓扑连接性, 因此它有助于分析传感器网络的骨干结构及其连通性。进一步地, 如果网络骨干结构具有全局刚性, 则相应的节点将具有可定位性。

因此, 本文借鉴图像处理中基于拓扑细化的骨架提取方法<sup>[41-42]</sup>, 逐步提取水下传感器网络的骨干结构, 并利用刚性图理论判断其全局刚性, 找到具有全局刚性的最大网络骨干结构(骨架), 从而完成网络及节点的可定位性判别。

**定义 1.** 骨架。对于水下传感器网络无向图  $G=(V, E)$ , 若  $G^*$  是具有全局刚性的  $G$  的最大子集, 则称  $G^*$  是该水下传感器网络的骨架。

可见, 如果能提取水下传感器网络的骨架, 将有助于判别网络及其节点的可定位性。以下为设计的骨架提取策略。

##### (1) 伪节点剔除

**定义 2.** 节点的度。节点  $i$  的度是它的邻居节点的个数, 即与它相连的节点个数, 记作  $deg(i)$ 。

**定义 3.** 伪节点。在三维空间中, 若  $deg(i) < 4$ , 则称节点  $i$  为伪节点。

**定理 5.** 对于无向图  $G$ (三维水下传感器网络), 伪节点一定不在其骨架上。

证明。假设伪节点  $i$  在水下传感器网络的骨架  $G^*$  上。因为  $G^*$  具有全局刚性, 所以根据定理 3,  $G^*$  具有 4-连通性, 即任意删除少于 4 个顶点及其附带的边,  $G^*$  的剩余部分仍然是连通的。此时如果将与伪节点  $i$  相连接的  $deg(i)$  个节点及其附带的边删除, 则伪节点与网络分离, 造成  $G^*$  的剩余部分不再是连通的, 这与  $G^*$  的 4-连通性相矛盾, 因此上述假设不成立。

证毕。

依据定理 5, 提出骨架提取策略一: 伪节点剔除, 其具体步骤如下:

针对无向图  $G$ , 计算每个普通节点  $s_j$  的度  $deg(s_j)$ ,

① Hfut-TI DSP United Research Lab. [EB/OL]. <http://dsp.hfut.edu.cn/download/ssxh.pdf>, 2013, 11, 30

找到度最小的节点,判断它是否为伪节点(节点度是否小于4),若是,则将该节点及其附带的边从图  $G$  中删除,更新剩余无向图中节点的度,重复上述步骤;若否,即所有节点的度均大于等于4,则此过程结束.该过程的算法描述如下.

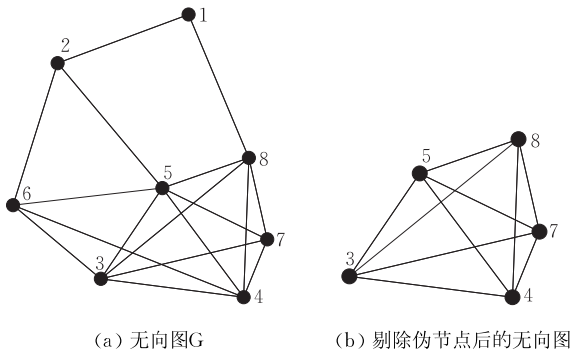
### 算法 1. 伪节点剔除.

输入:  $G=(V,E)$ , the number of common node  $m$

输出: The left graph  $G_{\text{left}}=(V_{\text{left}},E_{\text{left}})$ .

1. Initialization:  $V_{\text{left}}=V$ ;  $E_{\text{left}}=E$ ;  $k=m$ ;
2. DO WHILE
3. FOR  $i \leftarrow 1$  to  $k$  DO
4.  $deg(s_i)$  = the number of adjacent nodes of  $s_i$ ;
5. END
6.  $mindeg = \min(deg(s_i))$ ; //find the minimum degree
7. IF ( $mindeg < 4$ ) THEN //eliminate pseudo node
8.  $V_{\text{left}} = V_{\text{left}} - \{s_i\}$ ;
9.  $E_{\text{left}} = E_{\text{left}} - \{(s_i, s_j) \mid s_j \in V_{\text{left}}, (s_i, s_j) \in E_{\text{left}}\}$ ;
10.  $k = |V_{\text{left}}|$ ;
11. END
12. END WHILE ( $mindeg \geq 4$ )

图 4 给出了一个无向图  $G$  进行伪节点剔除的实例.节点 1、2、6 先后被判断为伪节点,并从图  $G$  中删除.最终剩下的无向图如图 4(b)所示.



(a) 无向图  $G$

(b) 剔除伪节点后的无向图

图 4 无向图进行伪节点剔除的实例

## (2) 割边剔除

经过伪节点剔除后,剩余的无向图中的顶点具有了较高的度,但剩余的无向图仍然可能不是全局刚性的.例如图 5 所示的无向图,虽然每个顶点的度都大于等于4,但是该图不是全局刚性的.

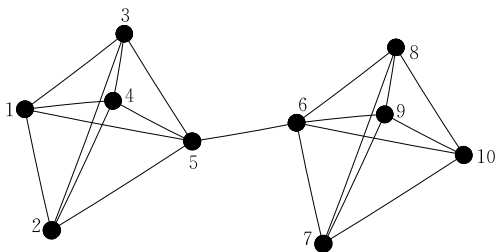


图 5 剔除伪节点后非全局刚性的无向图  $G$

**定义 4.** 割边. 在无向连通图  $G$  中,若删除某条边就使得该图不连通,则称该边为割边.例如图 5 中边(5,6).

**定理 6.** 对于无向图  $G$ (三维水下传感器网络),割边一定不在其骨架上.

证明. 假设割边  $e$  在水下传感器网络的骨架  $G^*$  上. 因为  $G^*$  具有全局刚性,所以根据定理 3,  $G^*$  具有 4-连通性. 此时如果将割边  $e$  的任意一端的节点及其附带的边删除,则  $G^*$  的剩余部分不再是连通的,这与  $G^*$  的 4-连通性相矛盾,因此上述假设不成立. 证毕.

依据定理 6,提出骨架提取策略 2:割边剔除,其具体步骤如下:

针对无向连通图  $G$ ,从任意一个顶点出发,进行深度优先搜索(Depth First Search,DFS),每搜索到一个顶点  $u$ ,如果它没有被访问的,则定义  $dep(u)$  为该顶点在 DFS 树中被经历到的次序号;然后访问与该顶点相邻的顶点,定义  $low(u)$  为该顶点或它的子树中能够通过非父子边追溯到的最早的顶点的序号.在最后形成的树中,如果对于顶点  $u$  的某个儿子节点  $v$ ,有  $low(v) > dep(u)$ ,那么  $(u,v)$  就是一条割边.该过程的算法描述如下.

### 算法 2. 割边剔除.

输入: The connected graph  $G=(V,E)$

输出: The left graph  $G_{\text{left}}=(V_{\text{left}},E_{\text{left}})$ .

1. Initialization:  $V_{\text{left}}=V$ ;  $E_{\text{left}}=E$ ;  $k = |V_{\text{left}}|$ ;
2. FOR  $i \leftarrow 1$  to  $k$  DO
3.  $visit[i] = \text{FALSE}$ ; //FALSE 标记尚未访问
4. END
5.  $DFS(u, \text{father}, \text{depth})$ ;
- //  $u$  当前节点,  $\text{father}$  父节点,  $\text{depth}$  记录 DFS 序号
6.  $visit[u] = \text{TRUE}$ ; //标记  $i$  访问,在处理中
7.  $dep[u] = \text{depth}$ ; //记录  $i$  的 DFS 深度
8. FOR  $v \leftarrow 1$  to  $A(s_u)$  DO
9. IF ( $v \neq s_u$ 's father and  $visit[v] = \text{TRUE}$ ) THEN
10.  $low[u] = \min(low[u], dep[v])$ ;
11. END
12. IF ( $visit[v] = \text{FALSE}$ ) THEN
13.  $DFS(v, u, \text{depth} + 1)$ ;
14.  $low[u] = \min(low[u], low[v])$ ;
15. END
16. IF ( $low[v] > dep[u]$ ) THEN //  $(s_u, s_v)$  为割边
17.  $E_{\text{left}} = E_{\text{left}} - \{(s_u, s_v)\}$ ;
18. END
19. END
20. END

注:  $A(s_u)$  是节点  $s_u$  的邻居节点个数.

### (3) 连通子图排序

无向图  $G$  在经过伪节点和割边剔除后, 剩余的无向图  $G'$  可能由一个或多个独立的连通子图组成. 例如, 图 6 所示的无向图  $G$  在经过伪节点和割边剔除后, 剩余的无向图  $G'$  由 2 个独立的连通子图组成, 如图 7 所示.

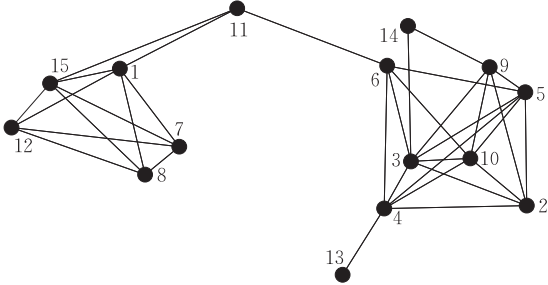


图 6 未经剔除的无向图  $G$

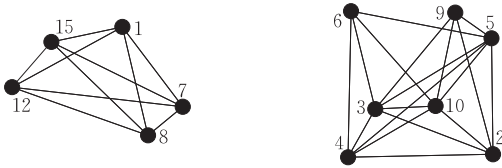


图 7 剔除后的无向图  $G'$

由于骨架是具有全局刚性的  $G$  的最大子集, 因此可根据上述多个独立的连通子图的规模<sup>①</sup>, 对它们进行降序排序, 依次判别它们是否为骨架以及它们的可定位性.

#### 3.3.3 骨架及其可定位性判别

对于连通子图, 通过定理 7 判别是否为骨架, 以及它的可定位性.

**定理 7.** 连通子图  $\hat{G}=(\hat{V}, \hat{E})$  是水下传感器网络的骨架, 且具有可定位性的充分必要条件是: (1) 图  $\hat{G}$  至少含有 5 个顶点; (2)  $\hat{G}$  的压力矩阵的秩为  $|\hat{V}|-4$ ; (3)  $\hat{G}$  至少含有 4 个锚节点.

**证明.** 对于无向图  $\hat{G}=(\hat{V}, \hat{E})$ , 每条边  $e_{ij}$  上存在均衡压力  $\omega_{ij}$ , 无向图  $\hat{G}$  可用压力矩阵加以描述. 根据定理 4, 在三维空间中, 当图  $\hat{G}$  至少含有 5 个顶点, 即  $|\hat{V}|>4$ , 并且均衡压力  $\omega=(\dots, \omega_{ij}, \dots)$  对应的压力矩阵  $S$  的秩为  $|\hat{V}|-4$  时, 图  $\hat{G}$  具有全局刚性, 因此  $\hat{G}$  是该水下传感器网络的骨架. 进一步根据定理 1, 当图  $\hat{G}$  中锚节点数大于等于 4 时, 则该图是可定位的. 证毕.

按照连通子图的排序, 利用定理 7 的条件(1)和(2), 依次判断各连通子图的全局刚性, 最早判断为全局刚性的连通子图即为水下传感器网络的骨架; 若找到骨架, 则利用条件(3)判断骨架的可定位性;

继续利用定理 7 判断排序在骨架后的连通子图的全局刚性和可定位性. 若没有找到骨架, 则整个网络是不可定位.

#### 算法 3. 骨架及其可定位性判别.

输入: 按降序排列的连通子图  $(\hat{G}_1, \hat{G}_2, \dots, \hat{G}_i, \hat{G}_N)$

输出: 网络骨架, 可定位的连通图

1.  $skeleton\_found = FALSE$ ;
2. FOR  $i \leftarrow 1$  to  $N$  DO
3.  $u =$  the number of vertices of  $\hat{G}_i$ ;
4. IF  $((u \geq 5)$  and  $(rank(S(\hat{G}_i)) = u - 4))$  THEN
5. IF  $(skeleton\_found == FALSE)$  THEN
6.  $\hat{G}_i$  is the skeleton of UWSNs;
7.  $skeleton\_found = TRUE$ ;
8. END
9.  $v =$  the number of anchor node of  $\hat{G}_i$ ;
10. IF  $(v \geq 4)$  THEN
11.  $\hat{G}_i$  is localizable;
12. END
13. END
14. END
15. IF  $(skeleton\_found == FALSE)$  THEN
16. UWSNs has no skeleton and localizable nodes;
17. END

### 3.4 节点的定位可信度综合评价

通过 3.3 节的方法可以判别出 UWSNs 中可定位的节点, 但在对这些节点进行定位计算时, 其结果的可信度是存在差异的, 它与多方面因素有关, 例如与节点相连的锚节点个数、节点的度、节点间的距离等. 如果可以综合以上因素对节点定位的可信度进行评价和排序, 从而确定节点定位计算的顺序, 将有助于提高节点定位的整体质量<sup>②</sup>.

由于需要考虑多方面因素和准则, 因此本文引入层次分析法 (Analytic Hierarchy Process, AHP)<sup>[43-44]</sup> 对节点定位的可信度进行综合排序. 层次分析法包括构建综合评价层次模型、构造成对比较矩阵、权向量计算与一致性检验以及数据模糊归一化四部分.

#### 3.4.1 构建综合评价层次模型

本文将综合评价层次模型分为 3 层: 目标层 (最高层)、准则层 (中间层)、方案层 (最底层). 其中, 目标层只有一个元素, 表示决策目标; 准则层包含影响目标实现的元素 (约束条件); 方案层包含实现决策目标的各可行方案.

在本文中, 目标层的决策目标是可定位节点的

① 连通子图的规模定义为图中顶点的个数.

② 在节点定位计算时, 通常需要将先定位出的节点作为新的锚节点, 其定位精度将会对后继节点的定位效果产生影响.

定位可信度综合排序; 准则层的元素包括与节点相连的锚节点个数、节点的度、节点间的距离; 方案层是可定位的节点. 综合评价层次模型如图 8 所示.

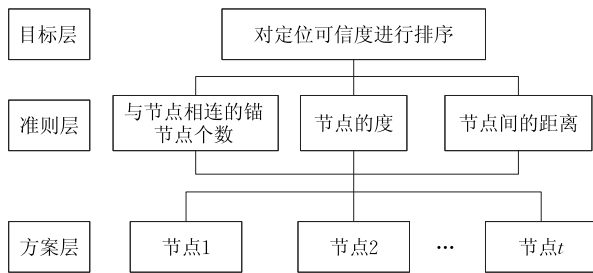


图 8 综合评价层次模型

### 3.4.2 构造成对比较矩阵

在构建的三级层次结构模型中, 准则层的第  $i$  个元素与第  $j$  个元素对决策目标的重要性采用数量化的相对权重  $a_{ij}$  来描述. 假设准则层中有  $M$  个元素参与比较, 则可构造出一个  $M$  阶矩阵  $\mathbf{A} = (a_{ij})_{M \times M}$ , 称之为成对比较矩阵.

在成对比较矩阵  $\mathbf{A}$  中, 第  $i$  行第  $j$  列的值为元素  $i$  与元素  $j$  重要性的比值, 它与第  $j$  行第  $i$  列的值互为倒数, 即  $a_{ij} = 1/a_{ji}$ ; 对角线元素为 1. 因此矩阵  $\mathbf{A}$  为逆对称矩阵.

其中,  $a_{ij}$  的取值可参考 Saaty 的提议<sup>[43]</sup>, 按 1~9 赋值, 具体标度如下:

$a_{ij} = 1$ , 表示元素  $i$  与元素  $j$  的重要性相同;

$a_{ij} = 3$ , 表示元素  $i$  与元素  $j$  稍重要;

$a_{ij} = 5$ , 表示元素  $i$  与元素  $j$  明显重要;

$a_{ij} = 7$ , 表示元素  $i$  与元素  $j$  强烈重要;

$a_{ij} = 9$ , 表示元素  $i$  与元素  $j$  极端重要;

$a_{ij} = 2l, l = 1, 2, 3, 4$ , 表示元素  $i$  与元素  $j$  的重要性之比值介于  $a_{ij} = 2l - 1$  与  $a_{ij} = 2l + 1$  之间.

$a_{ji} = 1/l, l = 1, 2, \dots, 9$ , 当且仅当  $a_{ij} = l$ .

本文根据多个因素(元素)对节点定位计算的影响, 对成对比较矩阵进行设置, 从而构造出成对比较矩阵.

### 3.4.3 计算权向量与一致性检验

#### (1) 计算权向量

得到成对比较矩阵  $\mathbf{A}$  后, 计算各个元素对决策目标的权重, 即计算准则层的权向量.

利用  $\mathbf{A}\mathbf{w} = \lambda\mathbf{w}$  求出矩阵  $\mathbf{A}$  的所有特征值  $\lambda$ , 其中  $\lambda_{\max}$  为矩阵  $\mathbf{A}$  的最大特征值. 求出  $\lambda_{\max}$  所对应的特征向量  $\mathbf{w}^*$ , 然后把它归一化为向量  $\bar{\mathbf{w}}$ , 则  $\bar{\mathbf{w}} = [\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_M]^T$  就是各个元素的权重.

#### (2) 一致性检验

对于成对比较矩阵  $\mathbf{A}$ , 若满足条件  $a_{ik}a_{kj} = a_{ij}$ ,

( $i, k, j = 1, 2, \dots, M$ ), 则称  $\mathbf{A}$  为一致性矩阵. 一致性矩阵在逻辑上是合理的, 有助于后继的综合分析. 由于 3.4.2 节构造的成对比较矩阵不一定具有一致性, 因此需对其进行一致性检验. 如果检验通过,  $\mathbf{A}$  即可用于后继的综合分析; 否则需要重新构造成对比较矩阵. 检验步骤如下.

第 1 步. 计算一致性指标  $CI$  (Consistency Index):

$$CI = \frac{\lambda_{\max} - M}{M - 1} \quad (3)$$

第 2 步. 查表确定平均随机一致性指标  $RI$  (Random Index). 根据成对比较矩阵的阶数, 查表 1 得到平均随机一致性指标.

表 1 平均随机一致性指标

$M$	$RI$	$M$	$RI$
1	0	6	1.24
2	0	7	1.32
3	0.58	8	1.41
4	0.90	9	1.45
5	1.12	10	1.49

第 3 步. 计算一致性比例  $CR$  (Consistency Ratio):

$$CR = \frac{CI}{RI} \quad (4)$$

第 4 步. 一致性判断. 当  $CR < 0.1$  时, 认为成对比较矩阵的一致性在可接受范围内; 否则, 认为未通过一致性检验, 需要依次调整成对比较矩阵中有待商榷的比值, 使其  $CR$  在可接受的范围内.

### 3.4.4 数据模糊归一化

在计算出权向量之后, 需要对准则层各元素的数据进行处理. 在准则层各元素中, 有的是越大越好, 被称为正向指标; 有的是越小越好, 被称为逆向指标. 同时, 各元素的单位量纲不同, 其量值也会有较大的差异, 因此需要进行数据的归一化.

节点  $i$  ( $i = 1, 2, \dots, t$ ) 的 3 个元素(相连的锚节点数、节点的度、节点间的距离)的数据模糊归一化形式为

$$N'_i = N_i / N_{\max} \quad (5)$$

$$D'_i = D_i / D_{\max} \quad (6)$$

$$R'_i = 1 - R_i / R_{\max} \quad (7)$$

其中,  $N_i, D_i, R_i$  分别为节点  $i$  相连的锚节点数、节点的度、节点间的距离均值;  $N_{\max}, D_{\max}, R_{\max}$  分别为网络中可定位节点的相连锚节点数的最大值、度的最大值、与邻居节点间距离的最大值.

结合节点  $i$  的归一化的数据和权向量  $\bar{\mathbf{w}}$ , 计算节点  $i$  的定位可信度:



$$Y_i = [N'_i, D'_i, R'_i] \cdot \bar{w}, i = 1, 2, \dots, t \quad (8)$$

进而可以根据定位可信度对所有可定位节点进行排序。

### 4 实验结果分析

为了验证本文基于骨架提取的水下传感器网络刚性定位判别方法的正确性和有效性,在 MATLAB 7.0 平台上进行了一系列仿真实验. 仿真实验场景设计如下:在 60 cm×30 cm×30 cm 的三维空间中分别搭建了 10 种规模的网络,每个网络均含有若干锚节点和多个普通节点,具体数据如表 2 所示。

分别采用本文方法和 LSLS 方法判别这些网络中普通节点的可定位性,并对结果进行统计分析。

表 2 实验参数设置

实验分组	网络节点总数	锚节点个数	普通节点个数
1	10	4	6
2	12	4	8
3	14	5	9
4	16	5	11
5	18	6	12
6	20	6	14
7	22	7	15
8	24	7	17
9	60	14	46
10	114	25	89

注:所有节点的通信半径  $r^c = 10$  cm.

其中,第 1 组实验结果如图 9~11 所示. 图 9 是搭建的网络结构,其中标号为 1、2、3、4 的节点是锚节点(黑色节点),标号为 6、7、8 的节点是确定为可定位的节点(浅灰色节点),标号为 5、9、10 的节点是确定为不可定位的节点(白色节点)。

按照本文方法,首先构建出无向图  $G$ ,如图 10 所示. 然后执行骨架提取策略(伪节点剔除、割边剔除和连通子图排序),得到一个连通子图,如图 11 所示. 最后根据定理 7 判别连通子图的可定位性:

(1) 该连通子图含有 7 个顶点;(2) 其压力矩阵为

$$S = \begin{bmatrix} 1.20 & -1 & 1 & -1.16 & 0 & 0.45 & -0.49 \\ 1.00 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -1.00 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1.16 & 0 & 0 & -1.12 & 0 & 0.43 & -0.47 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -0.45 & 0 & 0 & 0.43 & 0 & -0.18 & 0.20 \\ 0.49 & 0 & 0 & -0.47 & 0 & 0.20 & -0.22 \end{bmatrix}$$

矩阵的秩为  $3 = |\hat{V}| - 4$ ;(3) 含有 4 个锚节点. 因此可判别该连通子图是网络的骨架,且具有可定

位性. 那么,骨架上标号为 6、7、8 的节点是可定位的,相应的标号为 5、9、10 的节点是不可定位的. 该结果与真实情况一致。

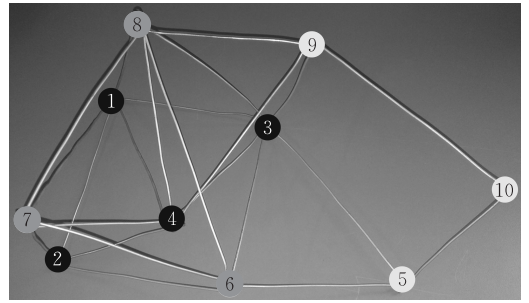


图 9 搭建的网络

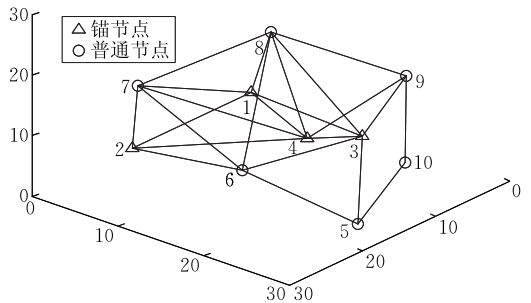


图 10 无向图  $G$

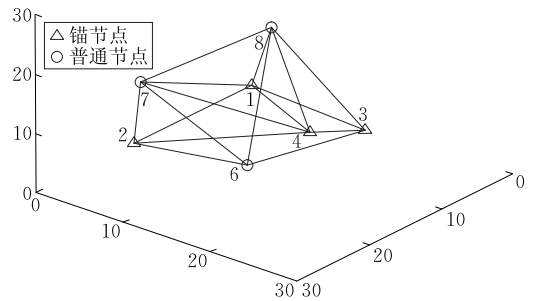


图 11 网络骨架

表 3 给出了上述可定位节点的定位可信度排序. 采用 AHP 方法, 构建的成对比较矩阵  $A$  如下:

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 3 & 5 \\ 1/3 & 1 & 3 \\ 1/5 & 1/3 & 1 \end{bmatrix}$$

计算出  $A$  的最大特征值  $\lambda_{\max} = 3.039$ , 进一步求出特征向量  $w^* = [0.916 \quad 0.372 \quad 0.151]^T$ , 归一化后的权向量  $\bar{w} = [0.637 \quad 0.258 \quad 0.105]^T$ .

一致性检验  $CI = 0.019, RI = 0.58, CR = 0.033 < 0.1$ , 因此成对比较矩阵  $A$  具有较好的一致性.

数据模糊归一化  $N'_{\max}, D'_{\max}, R'_{\max}$  分别为 3、5、17.238; 根据式 (5)~(8) 分别计算出每个节点的  $N'_i, D'_i, R'_i$  及其定位可信度  $Y_i$ , 如表 3 所示. 表 3 的结果可作为节点定位计算先后顺序的重要依据.

表 3 节点定位可信度排序

排序	节点标号	$N_i$	$D_i$	$R_i$	$N'_i$	$D'_i$	$R'_i$	$Y_i$
1	8	3	5	16.663	1	1	0.033	0.899
2	7	3	5	17.238	1	1	0	0.895
3	6	2	4	16.602	0.667	0.8	0.037	0.635

第 4 组实验结果如图 12~图 15 所示. 图 12 是搭建的网络结构,其中标号为 1、2、3、4、5 的节点是锚节点,标号为 7、8、9 的节点是确定为可定位的节点,标号为 6、10、11、12、13、14、15、16 的节点是确定为不可定位的节点.

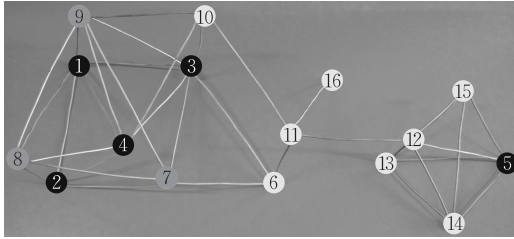


图 12 搭建的网络

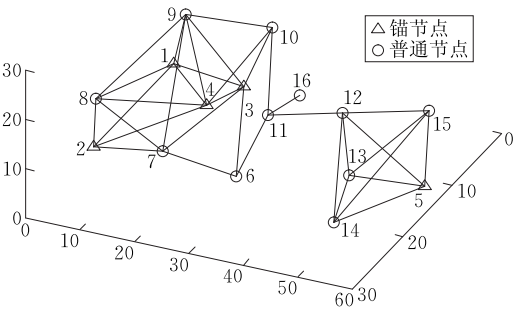


图 13 无向图 G

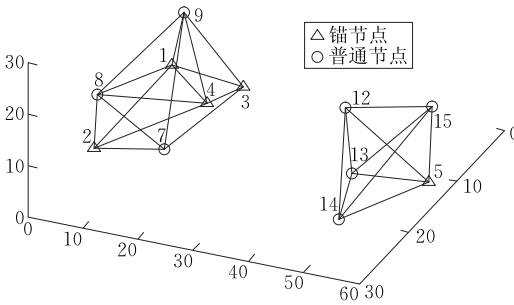


图 14 经骨架提取后形成的连通子图

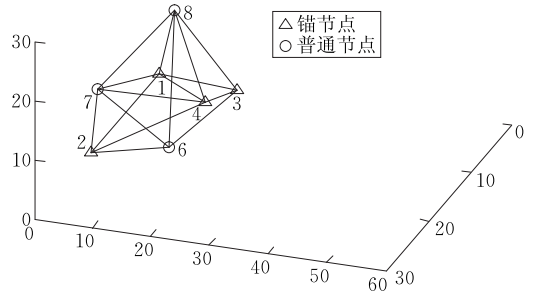


图 15 网络骨架

按照本文方法,首先构建出无向图 G,如图 13 所示.然后执行骨架提取策略(伪节点剔除、割边剔除和连通子图排序),得到两个独立的连通子图,如图 14 所示,其中规模较大的连通子图排序在前,另一个排序在后.最后,依次根据定理 7 判别它们的可定位性:规模较大的连通子图(图 15 所示)被判别为网络的骨架,且具有可定位性.那么,骨架上标号为 7、8、9 的节点是可定位的.另一个连通子图虽然具有全局刚性,但只含有一个锚节点,因此是不可定位的.综上,标号为 6、10、11、12、13、14、15、16 的节点是不可定位的.该结果与真实情况一致.

上述两组实验结果初步验证了本文方法的有效性和正确性.表 4 进一步给出了 10 组实验的统计结果,并与 LSLS 方法进行了比较.可见,在 10 组实验中,本文方法的判别成功率为 87.5%~100%,其平均成功率为 98.4%;LSLS 方法的查找成功率为 0~50%,其平均成功率为 27.8%.本文方法具有明显的性能优势.表 4 充分表明本文方法应用于三维水下传感器网络节点可定位性判别具有较高的正确性和有效性.

由于 LSLS 方法执行具有一定的随机性,因此其查找成功率值是 20 次程序运行结果的均值.

锚节点数、节点密度和网络连通性都会对网络中节点的可定位性产生影响.表 4 已经示出了锚节点数和节点密度变化对可定位节点数的影响.以下,

表 4 10 组实验的统计结果

实验分组	网络节点总数	锚节点数 $n$	普通节点数 $m$	实际可定位节点数 $\eta$	本文方法判别结果			LSLS 方法查找结果		
					可定位节点数 $\eta'$	确为可定位的节点数 $\eta''$	判别成功率 $r/\%$	可定位节点数 $\eta'$	确为可定位的节点数 $\eta''$	查找成功率 $r/\%$
1	10	4	6	3	3	3	100.0	0	0	0
2	12	4	8	4	4	4	100.0	1	1	25.0
3	14	5	9	4	4	4	100.0	2	2	50.0
4	16	5	11	3	3	3	100.0	0	0	0
5	18	6	12	4	4	4	100.0	2	2	50.0
6	20	6	14	4	4	4	100.0	0	0	0
7	22	7	15	8	7	7	87.5	2	2	25.0
8	24	7	17	6	6	6	100.0	3	3	50.0
9	60	14	46	25	24	24	96.0	9	9	36.0
10	114	25	89	62	62	62	100.0	26	26	41.9

注:判别成功率/查找成功率  $r = \eta''^2 / \eta \cdot \eta'$ .

我们将通过拓展实验分析网络连通性变化对节点可定位性的影响以及本文方法的判别效果. 在相同实验场景下进行了类似的 10 组实验, 节点的通信半径  $r_c$  增大为 15 cm(网络连通性得以增强). 分别采用本文方法和 LSLS 方法判别这些网络中节点的可定位性, 并对结果进行统计分析, 结果如表 5 所示.

与表 4 相比可见, 当网络连通性增强时, 网络中

“实际可定位节点数”有所增加, 此时, 两种方法判别出的可定位节点数均有所增多, 并且本文方法的判别成功率仍保持在较高水平(83.3%~100%), 其平均成功率为 97.2%, 而 LSLS 方法的查找成功率为 0~65%, 其平均成功率为 44.8%, 与本文方法仍有较大差距. 拓展实验表明: 本文方法在不同网络连通性情况下均具有较高的正确性和有效性.

表 5 拓展实验中 10 组实验的统计结果

实验分组	网络节点总数	锚节点数 $n$	普通节点数 $m$	实际可定位节点数 $\eta$	本文方法判别结果			LSLS 方法查找结果		
					可定位节点数 $\eta'$	确为可定位的节点数 $\eta''$	判别成功率 $r/\%$	可定位节点数 $\eta'$	确为可定位的节点数 $\eta''$	查找成功率 $r/\%$
1	10	4	6	5	5	5	100.0	0	0	0
2	12	4	8	5	5	5	100.0	2	2	33.3
3	14	5	9	6	6	6	100.0	3	3	50.0
4	16	5	11	6	5	5	83.3	4	4	56.3
5	18	6	12	8	8	8	100.0	5	5	62.5
6	20	6	14	6	6	6	100.0	2	2	37.5
7	22	7	15	11	10	10	90.9	5	5	45.5
8	24	7	17	9	9	9	100.0	5	5	55.6
9	60	14	46	40	40	40	100.0	26	26	65.0
10	114	25	89	82	80	80	97.6	35	35	42.7

## 5 总 结

本文研究了水下传感器网络节点可定位性问题, 提出了一种基于骨架提取的刚性定位判别方法. 该方法首先利用水声能量衰减模型计算邻居节点间的距离, 构建出水下传感器网络无向图; 然后执行骨架提取策略(伪节点剔除、割边剔除和连通子图排序), 得到一个或多个连通子图, 并利用刚性图理论判断其全局刚性, 找到具有全局刚性的最大连通子图(骨架), 进一步完成网络及节点可定位性判别; 最后, 利用层次分析法对可定位节点进行定位可信度综合排序, 从而为定位计算提供指导和依据.

大量仿真实验结果表明本文方法在不同网络规模、节点密度和网络连通性情况下均具有较高的判别成功率, 因此可作为水下传感器网络节点可定位性判别的有效方法.

本文将刚性图理论引入水下传感器网络节点定位的研究, 完善了相关理论方法体系; 提出了基于骨架提取的刚性定位判别方法, 以逐步“剥离”的方式找到可定位的网络局部区域及节点; 进一步为节点定位可信度排序为后期的定位计算提供了指导和依据. 下一步工作是在实际的水下环境中进行理论方法测试, 并拓展其综合应用.

致 谢 审稿人对本文提出了宝贵的评审意见, 编辑付出了辛勤的工作, 在此一并表示致谢!

## 参 考 文 献

- [1] Guo Zhong-Wen, Luo Han-Jiang, Hong Feng, et al. Current progress and research issues in underwater sensor networks. *Journal of Computer Research and Development*, 2010, 47(3): 377-389(in Chinese)  
(郭忠文, 罗汉江, 洪锋等. 水下无线传感器网络的研究进展. *计算机研究与发展*, 2010, 47(3): 377-389)
- [2] Akyildiz I F, Pompili D. Underwater acoustic sensor networks: Research challenges. *Elsevier Journal of Ad Hoc Networks*, 2005, 3(3): 257-279
- [3] Berger C R, Zhou S L, Willett P. Stratification effect compensation for improved underwater acoustic ranging. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2008, 56(8): 3779-3783
- [4] King P, Venkatesan R, Li C. An improved communications model for underwater sensor networks//*Proceedings of the 2008 IEEE Global Telecommunication Conference*. New Orleans, USA, 2008: 1-6
- [5] Xia Na, Wang Chang-Sheng, Zheng Rong, Jiang Jian-Guo. Fish swarm inspired underwater sensor deployment. *Acta Automatica Sinica*, 2012, 38(2): 295-302(in Chinese)  
(夏娜, 王长生, 郑榕, 蒋建国. 鱼群启发的水下传感器节点布置. *自动化学报*, 2012, 38(2): 295-302)
- [6] Xia Na, Zheng Yu-Chen, Du Hua-Zheng, et al. Rigidity driven underwater sensor self-organized deployment. *Chinese Journal of Computers*, 2013, 36(3): 494-505(in Chinese)  
(夏娜, 郑语晨, 杜华争等. 刚性驱动水下传感器节点自组织布置. *计算机学报*, 2013, 36(3): 494-505)
- [7] Pompili D, Melodia T, Akyildiz I F. Distributed routing

- algorithms for underwater acoustic sensor networks. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2010, 9(9): 2934-2944
- [8] Lee U C, Wang P, Noh Y T, et al. Pressure routing for underwater sensor networks//*Proceedings of the 2010 IEEE International Conference on Computer and Communications*. San Diego, USA, 2010: 1-9
- [9] Tan X, Li J. Cooperative positioning in underwater sensor networks. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2010, 58(11): 5860-5871
- [10] Teymorian A Y, Cheng W, Ma L, et al. 3D underwater sensor network localization. *IEEE Transactions on Mobile Computing*, 2009, 8(12): 1610-1621
- [11] Ismail N S N, Hussein L A, Ariffin S H S. Analyzing the performance of acoustic channel in underwater wireless sensor network (UWSN)//*Proceedings of the 2010 4th Asia International Conference on Mathematical/Analytical Modeling and Computer Simulation*. Kota Kinabalu, Malaysia, 2010: 550-555
- [12] Wei Zhi-Qiang, Yang Guang, Cong Yan-Ping. Security of underwater sensor networks. *Chinese Journal of Computers*, 2012, 35(8): 1594-1606(in Chinese)  
(魏志强, 杨光, 从艳平. 水下传感器网络安全研究. *计算机学报*, 2012, 35(8): 1594-1606)
- [13] Cheng X Z, Shu H N, Liang Q L, et al. Silent positioning in underwater acoustic sensor networks. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2008, 57(3): 1756-1766
- [14] Cheng W, Thaeler A, Cheng X Z, et al. Time-synchronization free localization in large scale underwater acoustic sensor networks//*Proceedings of the 29th IEEE International Conference on Distributed Computing Systems Workshops*. Montreal, Canada, 2009: 80-87
- [15] Erol M, Vieira L F M, Gerla M. AUV-aided localization for underwater sensor networks//*Proceedings of the International Conference on Wireless Algorithms, Systems and Applications*. Chicago, USA, 2007: 44-54
- [16] Zhou Y, He J H, Chen K, et al. An area localization scheme for large scale underwater wireless sensor networks//*Proceedings of the International Conference on Communications and Mobile Computing*. Washington, USA, 2009: 543-549
- [17] Wei Xian-Min. Underwater sensor networks localization based on polyhedron centroid algorithm. *Computer Science*, 2012, 39(5): 102-105(in Chinese)  
(魏先民. 基于多面体质心算法的水下传感网络定位. *计算机科学*, 2012, 39(5): 102-105)
- [18] Zhou Z, Cui J H, Zhou S. Efficient localization for large-scale underwater sensor networks. *Ad Hoc Networks*, 2010, 8(3): 267-279
- [19] Luo H J, Guo Z W, Dong W, et al. LDB: Localization with directional beacons for sparse 3D underwater acoustic sensor networks. *Journal of Networks*, 2010, 5(1): 28-38
- [20] Eren T, Goldenbreg D K, Whiteley W, et al. Rigidity, computation and randomization in network localization//*Proceedings of the 2004 IEEE International Conference on Computer and Communications*. Philadelphia, USA, 2004: 2673-2684
- [21] Jackson B, Jordan T. Connected rigidity matroids and unique realizations of graphs. *Journal of Combinatorial Theory B*, 2005, 94(1): 1-29
- [22] Aspnes J, Eren T, Goldenberg D K, et al. A theory of network localization. *IEEE Transactions on Mobile Computing*, 2006, 5(12): 1663-1677
- [23] Mao G Q, Fidan B, Anderson B D. Wireless sensor network localization techniques. *Computer Networks*, 2007, 51(10): 2529-2553
- [24] Wang Xiao-Ping, Luo Jun, Shen Chang-Xiang. Theory and algorithms on localization in wireless sensor networks. *Journal of Computer Research and Development*, 2011, 48(3): 353-363(in Chinese)  
(王小平, 罗军, 沈昌祥. 无线传感器网络定位理论和算法. *计算机研究与发展*, 2011, 48(3): 353-363)
- [25] Goldenberg D K, Krishnamurthy A, Maness W C, et al. Network localization in partially localizable networks//*Proceedings of the 2005 IEEE International Conference on Computer and Communications*. Miami, USA, 2005: 313-326
- [26] Yang Z, Liu Y H. Understanding node localizability of wireless Ad Hoc and sensor networks. *IEEE Transactions on Mobile Computing*, 2012, 11(8): 1249-1260
- [27] Zhang Y, Liu S T, Zhao X Y, Jia Z T. Theoretic analysis of unique localization for wireless sensor networks. *Ad Hoc Networks*, 2012, 10(3): 623-634
- [28] Asimow L, Roth B. The rigidity of graphs. *Transactions of the American Mathematical Society*, 1978, 245: 279-289
- [29] Fang J, Morse A S. Merging globally rigid graphs and sensor network localization//*Proceedings of the 48th IEEE Conference on Decision and Control and 28th Chinese Control Conference*. Shanghai, China, 2009: 1074-1079
- [30] Kim S, Kojima M, Waki H. Exploiting sparsity in SDP relaxation for sensor network localization. *Society for Industrial and Applied Mathematics Journal on Optimization*, 2009, 20(1): 192-215
- [31] Goldenberg D K, Bihler P, Cao M, et al. Localization in sparse networks using sweeps//*Proceedings of Annual International Conference on Mobile Computing and Networking*. Los Angeles, USA, 2006: 110-121
- [32] Zhu Z, So A M-C, Ye Y Y. Universal rigidity and edge sparsification for sensor network localization. *Society for Industrial and Applied Mathematics Journal on Optimization*, 2010, 20(6): 3059-3081
- [33] Zhu Z, So A M-C, Ye Y Y. Universal rigidity: Towards accurate and efficient localization of wireless networks//*Proceedings of the 2010 IEEE International Conference on Computer and Communications*. Chicago, USA, 2010: 1-9

- [34] Connelly R. Generic global rigidity. *Discrete Computational Geometry*, 2005, 33(4): 549-563
- [35] Gorler S J, Healy A D, Thurston D P. Characterizing generic global rigidity. *American Journal of Mathematics*, 2010, 132(4): 897-939
- [36] Sozer E M, Stojanovic M, Proakis J G. Underwater acoustic networks. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 2000, 25(1): 72-83
- [37] Thorp W H. Analytic description of the low-frequency attenuation coefficient. *Journal of the Acoustical Society of America*, 1967, 42(1): 270-270
- [38] Rathie R N, Silva P H D. Applications of Lambert W function. *International Journal of Applied Mathematics and Statistics*, 2011, 23(11): 1-15
- [39] Sandhu R S, Coyne E J, Feinstein H L, et al. Role-based access control models. *Computer*, 1996, 29(2): 38-47
- [40] Snavely N, Seitz S M, Szeliski R. Skeletal graphs for efficient structure from motion//*Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*. Anchorage, USA, 2008: 1-8
- [41] Rockett P I. An improved rotation-invariant thinning algorithm. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2005, 27(10): 1671-1674
- [42] Zhou Li, He Lin-Yuan, Sun Yi, et al. Algorithm of biased skeleton trim based on intersecting cortical model. *Journal of Computer Applications*, 2012, 32(9): 2553-2555, 2627 (in Chinese)  
(周理, 何林远, 孙毅等. 基于交叉视觉皮质模型的骨架伪分支剔除方法. *计算机应用*, 2012, 32(9): 2553-2555, 2627)
- [43] Saaty T L. What is the analytic hierarchy process. *Mathematical Models for Decision Support*, 1988, 48: 109-121
- [44] Wang A, Talcott C, Gurney A J T, et al. Reduction-based formal analysis of BGP instances//*Proceedings of the Tools and Algorithms for the Construction and Analysis of Systems*. Tallinn, Estonia, 2012: 283-298



**XIA Na**, born in 1979, Ph. D., professor. His main research areas are underwater sensor networks, navigation information processing, and computational intelligence and applications.

**WANG Shi-Liang**, born in 1988, master candidate. His research area is underwater sensor networks.

**ZHENG Rong**, born in 1975, Ph. D., associate professor.

## Background

Underwater sensor networks (UWSNs) can be applied in sea resources reconnaissance, pollution monitoring and assistant navigation etc, and it has become a hot field in wireless sensor networks. In UWSNs, sensor localization and its localizability judgment are important for all kinds of underwater applications.

The authors of this paper have conducted the research in this direction from 2005, and have been supported by the Ph. D. Programs Foundation of Ministry of Education of China (20070359029), the Natural Science Foundation of Anhui Province (070412035), the National Natural Science Foundation of China (61100211, 61003307) and the Program for New Century Excellent Talents in University of China (NCET-13-0768). The research team has done some creative work and published some papers on international or domestic journals and conference proceedings.

From 2009 to 2010, the first author Xia Na acted as a

Her research interests include network monitoring and diagnosis, cyber physical systems, and sequential learning and decision theory.

**DU Hua-Zheng**, born in 1986, Ph. D., candidate. Her research area are underwater sensor network and computational intelligence.

**XU Chao-Nong**, born in 1977, Ph.D., associate professor. His main research areas are self-organizing wireless networks and embedded system.

visiting scholar in WiSeR Lab of Computer Science Department, University of Houston, USA. During the period, he was mainly involved in the project "Wireless Structure Monitoring" (NSF CNS-0832089) and "Underwater Acoustic Sensor Networks". He concentrated on the research of sensor deployment and sensor localization in UWSNs, and cooperatively published several papers on GLOBECOM and INFOCOM.

Because the traditional methods always judge the localizability of the total network or single sensor node, which cannot exactly figure out the sensors which can be localized, we study and present a skeleton extraction based rigidity localization judgment method in this paper. The theoretical analysis and extensive simulations demonstrate that the proposed UWSNs localizability judgment method can achieve excellent success ratio and efficiency in the networks with different sensor numbers, sensor density and connectivity.