



华中科技大学学报(自然科学版)

Journal of Huazhong University of Science and Technology(Natural Science Edition)

ISSN 1671-4512,CN 42-1658/N

《华中科技大学学报(自然科学版)》网络首发论文

题目: 基于 AIS 数据的船舶锚位面积计算
作者: 李业, 任鸿翔, 程龙岷
DOI: 10.13245/j.hust.20239467
收稿日期: 2022-04-24
网络首发日期: 2022-11-02
引用格式: 李业, 任鸿翔, 程龙岷. 基于 AIS 数据的船舶锚位面积计算[J/OL]. 华中科技大学学报(自然科学版). <https://doi.org/10.13245/j.hust.20239467>



网络首发: 在编辑部工作流程中, 稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定, 且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式(包括网络呈现版式)排版后的稿件, 可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定; 学术研究成果具有创新性、科学性和先进性, 符合编辑部对刊文的录用要求, 不存在学术不端行为及其他侵权行为; 稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准, 正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性, 录用定稿一经发布, 不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容, 只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

出版确认: 纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊(光盘版)》电子杂志社有限公司签约, 在《中国学术期刊(网络版)》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版, 以单篇或整期出版形式, 在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊(网络版)》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物(ISSN 2096-4188, CN 11-6037/Z), 所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

DOI: 10.13245/j.hust.20239467

基于 AIS 数据的船舶锚位面积计算

李业^{1,2} 任鸿翔¹ 程龙岷³

(1. 大连海事大学航海学院, 辽宁 大连 116026; 2. 大连港引航站, 辽宁 大连 116000;
3. 长江引航中心镇江引航站, 江苏 镇江 212000)

摘要 针对锚泊船舶实际占用水域面积的快速计算和分析问题, 提出一种基于船舶自动识别系统(AIS)数据的船舶锚位面积计算方法. 首先, 对 AIS 轨迹数据进行集成、清洗、分段等预处理, 提高数据质量; 其次, 使用一种基于密度的停留点识别算法识别船舶锚泊点, 提取船舶锚位信息; 再次, 使用单调链凸包算法从船舶锚泊点中提取船舶锚位边界; 最后, 分别使用鞋带定理和多边形形心公式完成对锚位面积和落锚点概位的求取. 选取长江口锚地作为研究区域并进行实例验证, 实验结果表明, 利用该方法得到船舶锚位面积是可行的. 该方法为船舶锚地、锚位的合理规划和锚泊船舶的安全监管提供数据支撑, 对提高锚地利用率和安全性具有积极意义.

关键词 船舶; 自动识别系统(AIS)数据; 停留点识别; 锚位边界; 锚位面积

中图分类号 U652.6 文献标志码 A 文章编号 1671-4512(XXXX)XX-XXXX-XX

Calculation of ship anchor berth area based on AIS data

LI Ye^{1,2} REN Hongxiang¹ CHENG Longmin³

(1. Navigation College, Dalian Maritime University, Dalian 116026, China; 2. Dalian Pilot Station, Dalian 116000, China;
3. Zhenjiang Pilot Station, Changjiang Pilot Centre, Zhenjiang 212000, China)

Abstract Aiming at the problem of rapid calculation and analysis of the water area actually occupied by anchored ships, a calculation method of ship anchor berth area based on the Automatic Identification System (AIS) data is proposed. Firstly, the AIS trajectory data is pre-processed with integration, cleaning and segmentation to improve the data quality; secondly, a density-based stay point identification algorithm is used to identify the anchor points and extract the information of the ship anchor berth; thirdly, the monotone chain convex hull algorithm is used to extract the anchor berth boundary from the ship anchor points; finally, the shoelace theorem and the centroid formula for a polygon are used to obtain the ship anchor berth area and the approximate position of the dropped anchor respectively. Selecting the Yangtze River estuary anchorage as the study area and carrying on the example verification, the experimental results show that it is feasible to obtain the area of anchor berths by using this method. This method provides the data support for the reasonable planning of ship anchorages and anchor berths and the safety surveillance of anchored ships, and has the positive significance for improving the safety and the utilization rate of ship anchorages.

Key words ship; Automatic Identification System (AIS) data; stay point identification; anchor berth boundary; anchor berth area

海运是国际贸易中最主要的运输方式, 国际贸易总运量中的三分之二以上, 我国绝大部分进出口货物, 都是通过海运方式运输的^[1]. 近年来, 随着新冠肺炎疫情的持续蔓延, 各国陆续出台相关限制政策, 各国港口有数量空前的锚泊及排队等待卸货的船舶. 随之而来的是锚泊船只数量的爆炸式增长,

锚地的异常拥挤. 船舶锚地和锚位需求的日益增长与锚地资源相对紧缺的矛盾也愈发突出^[2].

为了提高船舶锚泊的效率与安全, 部分学者从锚位面积、锚地容量、锚位规划等方面出发开展了相关研究. 周春辉等人^[3]提出一种基于 Voronoi 图的内河船舶锚位面积计算方法, 计算和分析锚泊船舶占用水域面积情况. 唐皇等人^[4]采用聚类方法从

收稿日期 2022-04-24.

作者简介 李业(1989-), 男, 博士研究生, E-mail: leaf-pilot@outlook.com.

基金项目 国家自然科学基金资助项目(52071312, 51939001); 辽宁省自然科学基金航运联合基金项目(2020-HYLH-29).

船舶轨迹数据中提取船舶锚泊数据, 并使用关联规则算法提取船舶锚泊半径. 郭子坚等人^[5,6]运用系统可靠性理论, 基于排队论和蒙特卡罗模拟的方法, 对锚地实用容量进行概率评价, 并对锚地冗余面积进行优化, 实验结果表明, 该方法有助于合理确定锚地容量. 刘明俊等人^[7]选取多种代表船型并对其在风、流影响下所需的锚位面积进行计算, 最终运用排队论对锚地容量的大小进行动态分析. Dindar Oz 等人^[8]提出了一种基于多目标优化策略的船舶锚泊位置选择方法, 旨在提高锚地利用率和减少锚泊事故的风险. Bahman Madadi 等人^[9]提出了一种考虑锚地时空利用率、船舶碰撞风险的多目标锚地规划算法, 仿真实验表明该方法可以优化锚地利用率和降低事故风险. 综上, 无论是锚地容量计算还是锚位规划等都离不开船舶锚位面积的计算, 因此如何合理地计算船舶锚位面积, 对于优化锚地资源、提高锚泊的效率和安全至关重要. 同时, 船舶锚位面积的正确计算对于锚泊船舶的安全监管, 降低船舶走锚和碰撞的风险有积极意义.

船舶自动识别系统(Automatic Identification System, AIS), 是指一种应用于船和岸、船和船之间的海事安全与通信的助航系统. 通过 AIS 可以轻松获取船舶的船名、载货、吃水、船位、航速、航向等重要信息^[10]. 因此, 由 AIS 数据形成的船舶轨迹可以高精度地还原船舶的锚泊情况. 本文首先对 AIS 轨迹数据进行集成、清洗、分段等预处理, 其次使用一种基于密度的船舶停留点识别方法提取船舶锚位信息, 再次使用单调链凸包算法求取锚位边界, 最后分别使用鞋带定理与多边形形心公式完成船舶锚位面积与落锚点概位的求取.

1 锚位面积计算方法

1.1 数据预处理

低质量的 AIS 数据将导致低质量的提取结果. 为提高数据质量, 需要对数据进行预处理. 本文数据预处理主要包括数据集成、数据清洗、轨迹分段.

第一步, 数据集成. 船舶锚泊分析中只有位置报告是不够的, 船舶静态和航行相关数据必不可少, 因此需要将不同报文数据整合在一起, 即数据集成. 本文依据 AIS 报文共有属性水上移动通信业务标识码(Maritime Mobile Service Identify, MMSI)实现不同报文的匹配, 集成数据.

第二步, 数据清洗. AIS 数据具有高采样率和异源性, 数据中不可避免的会出现冗余、噪声, 因此需要对数据进行清洗^[11]. AIS 数据清洗主要包括去重、光滑噪声等^[12]. 对于噪声点的发现与处理, 本文选用了一种较为简单有效的处理方式. 以图 1 的轨迹为例, 为了找出 p_5 这个噪声轨迹点, 首先计算点 p_4 到点 p_5 之间的距离 Δs , 再除以 p_4 和 p_5 两点的的时间间隔 Δt , 得到 p_4 到 p_5 之间的平均速度 v_a . 当 v_a 大于设定阈值 v_{th} 时, 例如 40 kn (全球商船的平均速度不足 12 kn, 最大速度一般不超过 30 kn, 当计算速度值超过 40 kn 时, 基本可以认定为异常), 判定 p_5 为异常轨迹点. 找到异常轨迹点后, 直接删除该噪声点, 从而完成轨迹去噪处理.

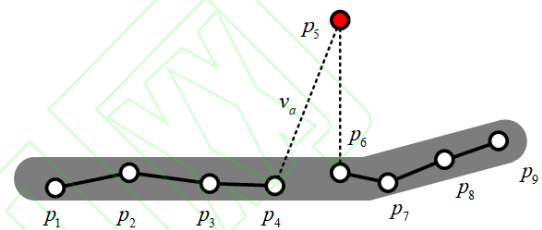


图 1 AIS 轨迹去噪示意图

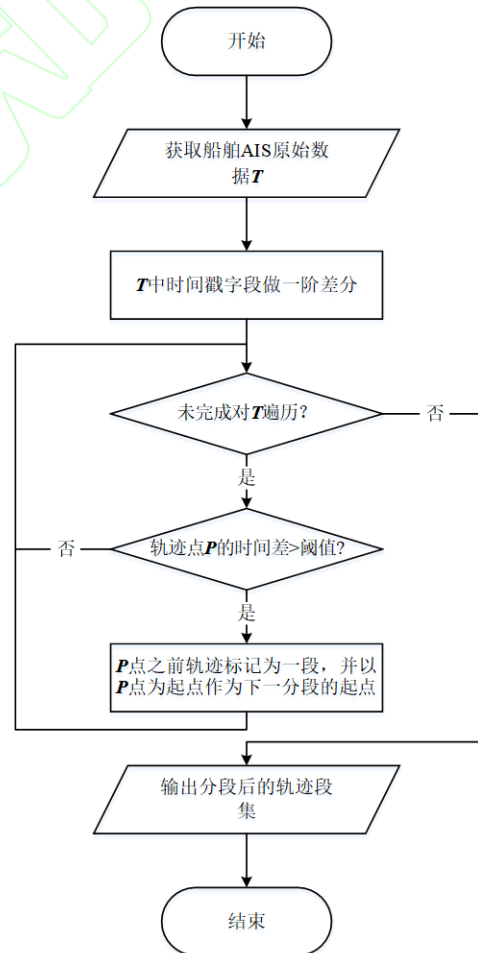


图 2 AIS 轨迹分段流程

第三步, 轨迹分段. 当我们获取一条特定区域、

特定时间段的船舶轨迹时，轨迹大多时候是比较混乱的，包含自相交、重复行驶等情况。这使得轨迹混乱不堪，并不利于我们做数据分析。因此，需要将一个完整轨迹按照规律切分为多个不同的轨迹段，以便于进一步分析。本文选取时间间隔作为分段条件对轨迹进行分段。考虑 AIS 的航行状态报告的报告间隔为 2-180 s，一般而言当连续轨迹点间的时间差大于 600 s 时，即可认定该轨迹点为分段点。具体分段流程如图 2 所示。

1.2 锚位识别

船舶锚位是指一个可供单一船只、海上飞机等停泊的指定水域，一般来说，是由中心点(落锚点)和一个旋回圈来定义。本文通过 AIS 轨迹数据完成船舶锚位识别。

虽然船舶 AIS 位置报告具有导航状态信息，但其设定需人工完成。实际操作过程中，存在参数修改不及时或设定错误等问题^[11]。通过导航状态参数获取船舶锚泊信息是不准确的，因此需要对船舶轨迹进行锚位识别，提取船舶锚泊水域范围。本文以文献[13]为基础，考虑船舶轨迹时空聚集的同时，兼顾船舶轨迹点的时间连续性和方向性，提出一种基于密度的船舶锚位提取方法。该方法的基本流程如图 3 所示，主要包括三个步骤：密度计算与候选停留点列表生成、停留点识别和锚位识别。

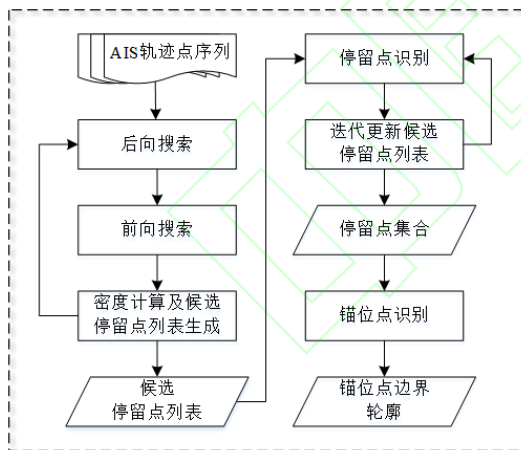


图 3 船舶锚位提取流程

步骤 1 密度计算与候选停留点列表生成。首先，依次以轨迹点序列中的各轨迹点为锚点，沿时间轴后向搜索和前向搜索，得到各锚点的密度区间(如给定船舶轨迹点序列中存在一最长连续子序列，其中任意一点与该锚点间的球面距离小于设定距离阈值，则该子序列为该锚点的密度区间)。其次，计算各锚点的密度(其密度区间中轨迹点数目)和时间跨度(其密度区间起点与终点的时间差)。再次，判断各锚点

的时间跨度是否大于设定时间阈值，是则该锚点为候选停留点。最后，生成候选停留点列表。其中锚点的密度计算原理如图 4 所示。

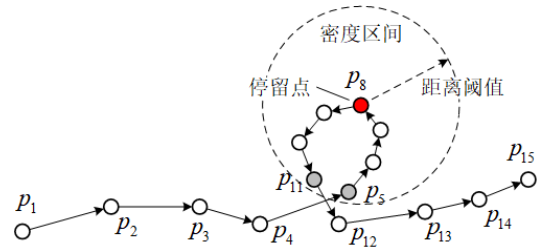


图 4 密度计算示意图

步骤 2 停留点识别。首先，依据密度对候选停留点列表进行降序排列，选取第一个候选停留点作为当前停留点 P_{stay} 。其次，遍历候选停留点列表，去除各候选停留点的密度区间与 P_{stay} 的密度区间的相交部分。再次，将 P_{stay} 加入到停留点集合，并且重新对列表中各候选停留点进行密度和时间跨度计算。然后，将列表中时间跨度小于设定时间阈值的点进行剪枝，更新列表。最后，重复以上各步，直至候选停留点列表为空。

步骤 3 锚位识别。船舶停留有两种状态：靠泊和锚泊。在锚泊过程中，由于水动力、风动力和锚链张力的影响，船舶会出现周期性偏荡。特别是当船舶锚泊在潮汐水域时，船舶的位置会随着潮流的变化而变化。因此，停留点位置与速度的标准差在锚泊期间较大，在靠泊期间较小。计算每个停留点位置和速度的标准差，如果标准差大于设定阈值，则为锚位点，否则，它是一个靠泊点。

1.3 锚位边界提取

船舶锚泊时段内的轨迹点是离散的、无明显规则的。通过 1.2 节计算得来的锚泊点需进行边界提取，以获取船舶实际的锚泊水域范围。对于散点轮廓的提取，目前已有多种方法被提出，比较典型的有凸包(Convex Hull，最外层点连接起来构成的一个包含所有给定点的最小凸多边形)与凹包(Concave Hull，最外层点连接起来构成的一个包含所有给定点的最小非凸多边形)算法^[14]。然而对于同一组散点数据，两种算法可能会得到不同的结果。如图 5 所示，相较于凹包算法，凸包算法所求得轮廓范围较大。考虑到锚泊船舶运动的随机性与 AIS 数据的精度，更大的锚泊水域范围，意味着更多的旋回水域，更大的安全余量。因此本文选取凸包算法求取锚泊点边界，力求通过 AIS 数据将船舶锚泊水域范围限定到最小，但又最大限度的保留安全余量。

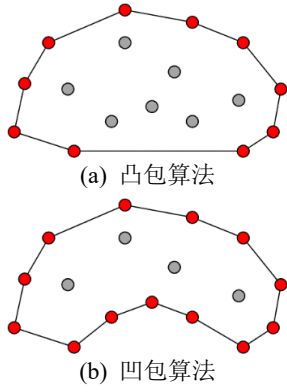


图5 散点轮廓提取

本文使用时间复杂度为 $O(n \log n)$ 的单调链凸包 (Monotone Chain Convex Hull) 算法^[15]求解锚泊点边界。算法大致流程如下：首先，把所有锚泊点以经度坐标为第一关键字，纬度坐标为第二关键字排序。排序后最小的元素和最大的元素一定在凸包上。然后，在寻找凸多边形过程中，如果从最左边的轨迹点出发顺时针走，轨迹总是“右拐”的(一旦出现左拐，就说明这一段不在凸包上)，最终到达最右边的轨迹点。这些轨迹点将形成上凸壳。同理从最右边点开始，尝试顺时针方向到达最左边，形成下凸壳。最后，将上下凸壳组合并返回凸包，即锚泊点的边界。

1.4 锚位面积与落锚点计算

受风流影响，船舶锚泊期间的活动范围是不规则的。通过锚位边界提取算法求得的锚位边界轮廓是个不规则凸多边形。因此，锚位面积的求取变成对任意凸多边形面积的求取。本文使用鞋带公式 (Shoelace Formula)^[16]完成对锚位面积的求取。鞋带公式是在给定顶点坐标的情况下计算平面中非自相交多边形面积的方法。该公式计算过程如图6所示，用表达式(1)表示：

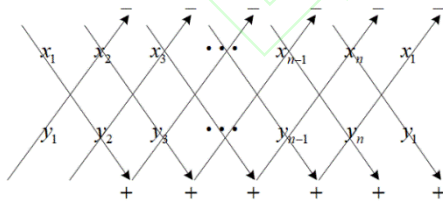


图6 鞋带公式计算过程示意图

$$S = \frac{1}{2} \left| x_1 y_2 + x_2 y_3 + \cdots + x_{n-1} y_n + x_n y_1 - x_2 y_1 - x_3 y_2 - \cdots - x_n y_{n-1} - x_1 y_n \right| \quad (1)$$

$$= \frac{1}{2} \left| \sum_{i=1}^{n-1} x_i y_{i+1} + x_n y_1 - \sum_{i=1}^{n-1} x_{i+1} y_i - x_1 y_n \right|,$$

式中： S 是多边形的面积； n 是多边形的边数； (x_i, y_i) ， $i=1, 2, \dots, n$ 是顺时针排序的多边形顶点。

本文 1.3 节求取的锚位边界点列表是顺时针排序的，将其直接输入公式(1)即可完成锚位面积的求取。依据锚位提取算法提取的锚位点是船舶 AIS 位置，并不是船舶的实际落锚位置。锚泊过程中，船舶围绕落锚点运动，运动范围受船舶自身长度、出链长度、水深等影响。本文选取锚位边界多边形的形心作为所求船舶的落锚点的概位。使用表达式(2)、(3)求取边界的形心^[17]。

$$C_x = \frac{1}{6S} \sum_{i=0}^{n-1} (x_i + x_{i+1})(x_i y_{i+1} - x_{i+1} y_i), \quad (2)$$

$$C_y = \frac{1}{6S} \sum_{i=0}^{n-1} (y_i + y_{i+1})(x_i y_{i+1} - x_{i+1} y_i), \quad (3)$$

式中： C_x 、 C_y 分别为所求形心的经纬度坐标，其余各元素含义与式(1)相同。

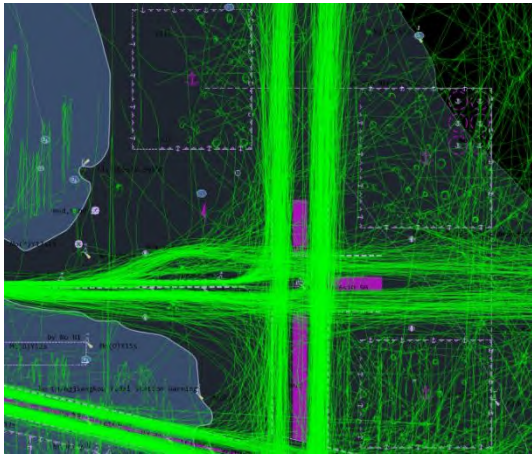
2 实验分析

2.1 实验数据

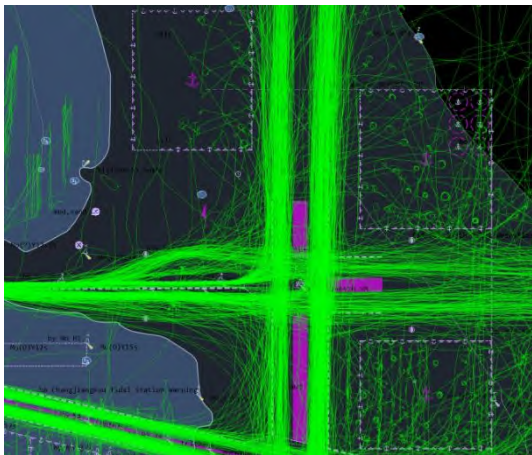
为验证该方法的可用性，本文选取长江口锚地及其附近水域为实验区域。长江口锚地位于长江口定线制内，包括长江口 NO.1 至 NO.3 锚地，锚地形状规则如图7所示。长江口 NO.1 锚地位于长江口 A 警戒区东北侧，该锚地主要是供大型船舶和拟经长江口深水航道进口的船舶使用。长江口 NO.2 锚地位于长江口深水航道 A 警戒区东南侧，该锚地主要是供中小型船舶和拟经南槽航道进口的船舶使用。长江口 NO.3 锚地位于长江口 A 警戒区西北侧，该锚地主要是供拟经长江口深水航道进港船舶使用。采集该水域 2019 年 4 月 1 日至 2 日的 1186 艘船舶的 316895 条 AIS 数据。原始船舶轨迹图如图8(a)所示。经去重、去噪、分段等预处理后得到 316100 条有效 AIS 数据，预处理后的船舶轨迹图如图8(b)所示。



图7 长江口锚地分布图



(a) 原始船舶轨迹图



(b) 预处理后船舶轨迹图

图8 2019年4月1日至2日长江口锚地船舶轨迹图

2.2 实验结果分析

《海港总体设计规范》^[18](以下简称《规范》)对船舶锚泊时所需的水域尺度给出了相关建议,指出船舶采用单锚系泊时,在理想状态下每个锚位所占水域为一圆形区域,其半径可按下列公式计算:

$$R = L + 3h + 90, \quad (4)$$

式中: R 为锚泊半径(m), L 为设计船长(m), h 为锚地水深(m). 本文以此公式为参照,对本文所提算法进行分析.

首先,利用本文 1.2 节锚位识别算法提取船舶锚位,其中依据相关航海经验距离阈值设置为 0.2 n mile,时间阈值设置为 30 min,最终识别到锚泊船只 200 余艘次.然后,计算锚泊船舶的锚位面积与落锚点概位,并根据所求锚泊船舶数据形成锚泊船舶数据记录集,记录相关船舶的抛起锚时间、锚位面积、落锚点等信息,详细记录如表 1 所示.表 1 中 S_{AIS} 表示根据本文所提算法所求锚位面积, S_d 表示根据《规范》得到的锚位面积(锚地水深 h 取值为 25 m).图 9 为 2019 年 4 月 1 日至 2 日锚泊船舶的轨迹图.本文以其中一艘巴拿马籍船舶“SAKIZAYA DIAMOND”轮(MMSI: 357573000, 船长: 229 m,

船宽: 32 m, 吃水: 11.5 m, 类型: 散货船)为例进行详细说明.图 10 是该轮 4 月 1 日至 2 日长江口水域的历史轨迹,红色标签标注部分为船舶锚泊期间的轨迹.图 11 中绿色点为该船锚泊期间的轨迹点,蓝色多边形为本文所提取的该船的锚位边界轮廓,红色点为本文所求的该轮落锚点的概位.

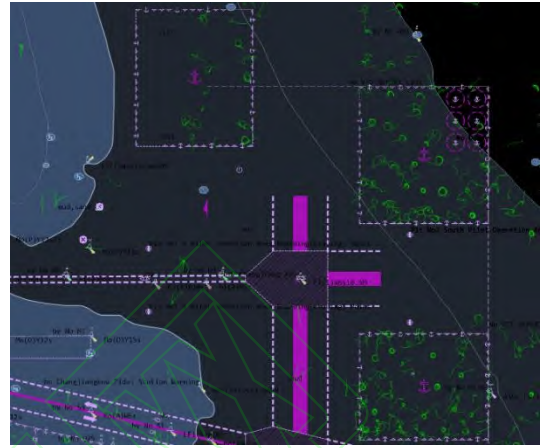


图9 2019年4月1日至2日长江口锚地锚泊船舶轨迹图

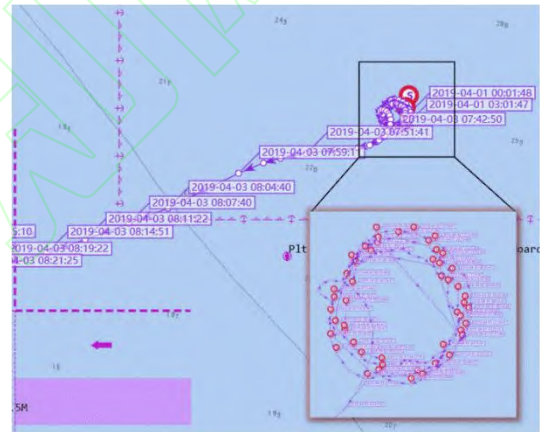


图10 “SAKIZAYA DIAMOND”轮船舶轨迹

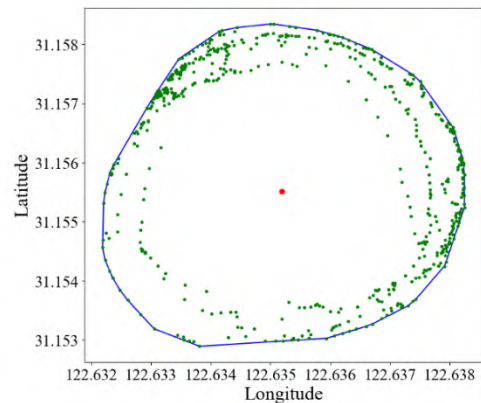


图11 “SAKIZAYA DIAMOND”轮锚位边界

表 1 统计结果显示,按照《规范》得到的锚位面积比根据本文所提算法计算而来的实际锚位面积要大.根据《规范》得到的锚位面积为船舶锚泊水域面积的推荐值,在此水域覆盖范围内,船舶是相

对安全的。但是，占用面积过大也会降低锚地利用率。因此，当有锚地资源异常紧张的情况出现，在气象水文条件允许，并留有足够的安全余量的情况下，可以考虑增加适当的锚位数量，降低船舶平均锚位面积占有量。在锚泊船舶的安全监控中，可以以推荐值为安全阈值，当船舶实际锚位面积超过此值，则予以提醒存在走锚或碰撞的风险。

同时，表 1 统计结果还显示长江口锚地船舶平均锚泊时间较长，而这会大大降低锚地的运行效率，造成大量船舶积压在锚地——“进不去，出不来”的尴尬局面。在当前全球航运节能减排和各国港口出台疫情限制政策的大背景下，航运公司应合理制订船舶运营计划，合理使用经济航速，避免出现船舶锚地长时间等待的问题。

表 1 2019 年 4 月 1 日至 2 日长江口锚地锚泊船舶信息表

MMSI	船长/船宽/吃水(m)	船舶类型	开始时间	结束时间	落锚点概位	S_{AIS} (m ²)	S_d (m ²)
357573000	229/32/11.0	散货	19-04-01 00:01:48	19-04-02 23:55:47	122°38.111'E/31°9.328'N	326749	487688
232002969	292/45/10.5	散货	19-04-01 08:31:40	19-04-02 04:04:35	122°40.357'E/31°9.456'N	327420	656118
374584000	90/14/4.0	油船	19-04-01 00:03:03	19-04-02 23:54:13	122°41.906'E/31°1.939'N	77120	204282
413332130	118/18/5.5	油船	19-04-01 00:07:34	19-04-02 10:01:45	122°27.061'E/30°58.996'N	110243	251607
413526070	164/28/5.0/6.2	集装箱	19-04-01 15:10:25	19-04-01 23:59:55	122°27.624'E/31°11.823'N	268515	340049
413788000	149/21/8.5	散杂货	19-04-01 12:57:17	19-04-02 03:34:39	122°34.679'E/31°1.663'N	209333	309748
414313000	190/32/6.0	散货	19-04-01 00:01:45	19-04-02 23:49:44	122°42.815'E/31°2.845'N	264946	395919
370587000	336/46/13.6	集装箱	19-04-02 09:14:07	19-04-02 23:58:56	122°37.142'E/31°12.815'N	215385	788542
...

3 结语

本文将数据挖掘算法与计算几何学相结合，提出一种锚位面积计算方法。首先，对 AIS 轨迹数据进行集成、清洗、分段等预处理；其次，使用一种基于密度的停留点检测算法识别船舶锚位；再次，使用单调链凸包算法提取船舶锚位边界；最后，分别使用多边形的面积公式和形心公式完成对锚位面积和落锚点概位的求取。选取长江口锚地水域的船舶 AIS 数据进行实例验证，结果表明，利用本文所提方法得到船舶锚位面积是可行的，该方法为锚地锚位的合理规划和锚泊船舶的安全监控提供数据支撑，对提高船舶锚地利用率和安全性具有积极意义。

然而，本文的研究也有不足之处。例如，锚位识别算法的阈值不能自动设定，锚位面积的计算缺乏对风流因素的考虑。在未来的研究中，当大量 AIS 数据需要处理时，应设计一种自适应确定阈值的方法，并采用分布算法来优化运行时间。收集风流信息，考虑风流因素对船舶锚位面积的影响。细化统计结果，以期挖掘出诸如锚泊方式、锚地位置等对单船锚位面积的影响 1。

参 考 文 献

- [1] MICHAEL N A, MELAS K D. Shipping markets in turmoil: An analysis of the Covid-19 outbreak and its implications[J]. Transportation Research Interdisciplinary Perspectives, 2020, 7: 100178.
- [2] MILLEFIORI L M, BRACA P, ZISSIS D, et al. COVID-19 impact on global maritime mobility[J]. Scientific Reports, 2021, 11(1): 1-16.
- [3] 周春辉, 赵俊男, 甘浪雄, 等. 基于 Voronoi 图的内河船舶锚位面积计算方法研究[J]. 中国航海, 2021, 44(2): 103-107.
- [4] 唐皇, 尹勇. 一种基于数据挖掘的锚泊半径模式提取方法[J]. 航海工程, 2017, 46(4): 206-209.
- [5] GUO Z, XU Y, YU Y, et al. Anchorage capacity reliability and redundancy optimization research in coastal ports[J]. Engineering Optimization, 2021, 53(5): 885-904.
- [6] 郭子坚, 薛天寒, 王文渊, 等. 港口锚地容量可靠性计算方法与冗余设计[J]. 大连理工大学学报, 2018, 58(5): 494-499.
- [7] 刘明俊, 刘佳仑, 周立. 基于排队论的三峡库区锚地容量分析[J]. 武汉理工大学学报(交通科学与工程版), 2013, 37(1): 35-38+43.

- [8] OZ D, AKSAKALLI V, ALKAYA A F, et al. An anchorage planning strategy with safety and utilization considerations[J]. Computers & Operations Research, 2015, 62: 12-22.
- [9] MADADI B , AKSAKALLI V . A stochastic approximation approach to spatio-temporal anchorage planning with multiple objectives[J]. Expert Systems with Applications, 2020, 146: 113170.
- [10] YANG D, WU L, WANG S, et al. How big data enriches maritime research—a critical review of automatic identification system (AIS) data applications[J]. Transport Reviews, 2019, 39(6): 755-773.
- [11] HARATI-MOKHTARI A, WALL A, BROOKS P, et al. Automatic Identification System (AIS): data reliability and human error implications[J]. The Journal of Navigation, 2007, 60(3): 373-389.
- [12] ZHENG Y. Trajectory data mining: an overview[J]. ACM Transactions on Intelligent Systems and Technology (TIST), 2015, 6(3): 1-41.
- [13] 李毓瑞, 陈红梅, 王丽珍, 等. 基于密度的停留点识别方法[J]. 大数据, 2018, 4(5): 80-93.
- [14] ASAEEDI S, DIDEHVAR F, MOHADES A. α -Concave hull, a generalization of convex hull[J]. Theoretical Computer Science, 2017, 702: 48-59.
- [15] ANDREW A M. Another efficient algorithm for convex hulls in two dimensions[J]. Information Processing Letters, 1979, 9(5): 216-219.
- [16] JASON R K. A Geometric Derivation of the Shoelace Theorem[EB/OL]. [2022.04.15]. <https://jrkoenig.com/2016/10/20/a-geometric-derivation-of-the-shoelace-theorem>.
- [17] WIKIPEDIA. Centroid[EB/OL]. [2022.04.15]. https://en.wikipedia.org/wiki/Centroid#Centroid_of_polygon.
- [18] 中华人民共和国交通运输部. JTS 165-2013 海港总体设计规范[S]. 北京: 人民交通出版社, 2013.