

# 基于离散航迹点的舰船航行轨迹仿真估计<sup>①</sup>

蔡星艳<sup>1</sup>, 卫强<sup>1</sup>, 张慧<sup>2</sup>, 张金芳<sup>2</sup>, 邓勇<sup>2</sup>

<sup>1</sup>(91635 部队, 北京 100000)

<sup>2</sup>(中国科学院软件研究所, 北京 100190)

**摘要:** 最近, 航海技术发展迅速, 在贸易、军事、科研等众多领域起到越来越重要的作用. 人们对于舰船航行的规划、仿真、监控与跟踪等方面的研究更细致、更全面. 本文主要研究基于舰船航行中跟踪到的稀疏航迹点的航线估计问题, 用于态势图的仿真显示. 为了估计出通过所有航迹点、合理、平滑的航线, 我们提出了由粗到细的航线估计算法, 该算法主要包含三个层级. 提出的算法使用数据量较小的经验航海线路图和全球海陆分布图, 这两种图的数据获取容易, 并且可实现较快速的航线估计. 大量实验证明, 提出的由粗到细的层级算法能较好的完成航线的估计. 同时, 提出的算法也可以用于舰船航行前的航线规划. 算法仍然存在一些问题和不足, 例如没有考虑海洋水深等问题, 这将是我们的下一步的研究内容.

**关键词:** 舰船航线; 由粗到细的航线估计; 最短路径; 避障算法

## Shipping Route Simulation and Estimation Based on Discrete Track Dot Series

CAI Xing-Yan<sup>1</sup>, WEI Qiang<sup>1</sup>, ZHANG Hui<sup>2</sup>, ZHANG Jin-Fang<sup>2</sup>, DENG Yong<sup>2</sup>

<sup>1</sup>(91635 Army, Beijing 100000, China)

<sup>2</sup>(Institute of Software, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

**Abstract:** Recently, the navigation technology achieves fast development and is playing an increasingly important role in areas of trading, military, and scientific research. About the route planning, simulation, monitoring and tracking of ship, more detailed and more comprehensive researches are being done. This paper focuses on the shipping route estimation based on discrete track dots, which is used for shipping route display in the situation map. To estimate a possible and smooth route going through all track dots, we propose a coarse-to-fine method, mainly including three levels. This method uses the experience nautical chart and the global sea and land distribution map, which are easy to get and help to achieve fast route simulation. Extensive experimental results show that the proposed coarse-to-fine shipping route estimation algorithm can fulfill the route simulation task. Meanwhile, the proposed method also can be used for shipping route planning before sailing. However, there are some problems about the proposed algorithm, such as without considering the water-depth condition which may influence the shipping route, but the research will continue.

**Keywords:** shipping route; coarse-to-fine route estimation; shortest path; obstacle avoidance algorithm

在航海相关的研究领域中, 航线设计是一项重要的工作. 然而, 对舰船进行追踪的任务需求也日趋增多. 本文要解决的问题主要是在舰船航行完成后, 基于舰船航行路线中的某些采样的位置(即离散的航迹点), 仿真估计出舰船的航行的连续轨迹. 与航线设计(实际航行前会对航线进行规划)不同, 基于航迹点

的航线估计需要满足的限制条件更多, 基本应满足以下条件: 1) 航行轨迹通过所有的航迹点, 即与已知实际路径航迹点一致; 2) 与实际航道情况相符合, 例如, 舰船不穿越陆地、岛屿, 路径点的空间位置和航向不会发生突然的剧烈变化等; 3) 航行轨迹曲线较平滑.

目前, 已经有一些工作尝试使用自动化航线设计

① 基金项目:北京市自然科学基金(4133092)

收稿时间:2013-10-21;收到修改稿时间:2013-11-20

代替人工拟定<sup>[1-5]</sup>. Bijlsma<sup>[2]</sup>等人把随机动态规划方法运用到随机动态网络中,找出最短路径.李源惠<sup>[3]</sup>等人提出了基于动态网格模型的航线自动生成算法,将整个地球海陆分布用网格中的方格是否可航表示,从而得到两点间的最短路径.张立华<sup>[4]</sup>等人提出了基于电子海图的设计方法,通过追踪安全等深线、处理障碍区从而得到可航渡的区域.不难看出,以上这些航线设计方法对于电子海图的依赖性非常高,精细的网格表示要求大量的数据存储空间和计算资源,甚至依赖其他一些更细致的信息.另外,有些障碍区的处理中采用几何处理方法,并没有证明其完备性,实验中发现,在某些复杂的障碍物边缘处容易陷入死循环.航海线路的设计也属于一类寻找最短路径的问题,郁振伟<sup>[5]</sup>等人利用 Dijkstra 算法和其改进算法对船舶最佳航线的最短路径做出定量的描述,但仅考虑已知点到点之间的几条备选线路的情况,不能完整的实现现实应用中的航线规划或者估计.最短路径的研究中,有其他一些关于 Dijkstra 算法的改进或者更先进的方法(如 A\*算法、B\*算法等),当使用的海图网络越精细复杂时,这些算法的作用越明显.

本文主要研究基于稀疏航迹点的航线规划问题,即根据输入的较为稀疏的航迹点序列数据(包括航迹点的经纬度坐标和到达时刻等),在具有障碍物(大陆与岛屿等)的环境中,寻找一条通过所有航迹点的最短路径.目前,电子海图资源较难获取,而且基于复杂电子海图的航线估计需要很长的计算时间.因此,我们提出了由粗到细的基于经验航海线路矢量图和全球海陆分布矢量图的航线估计.其中使用的经验航海线路图和全球海陆分布矢量图都是公开的,且数据量较小、取得容易.

## 1 由粗到细的船舶航行轨迹仿真估计算法

针对基于离散航迹点的舰船航行轨迹估计问题,我们提出由粗到细的快速船舶航行轨迹估计算法,主要包含以下步骤: 1)离散航迹点的预处理; 2)基于经验航海线路图的大范围舰船轨迹规划; 3)基于海洋陆地分布图的中小范围舰船轨迹规划; 4)舰船航行的全局优化.该算法基于输入的较稀疏的离散航迹点,由粗到细的仿真估计出舰船航行的轨迹,依据一些先验知识约束轨迹估计过程,算法流程如图 1 所示.层级的模块化设计方便算法的扩展,可较容易的综合多种

限制条件.

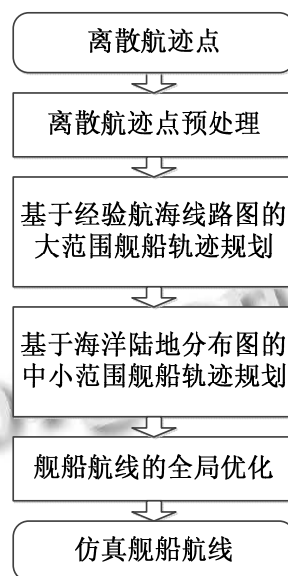


图 1 由粗到细的快速船舶航行轨迹估计算法框图

## 2 算法设计与实现

### 2.1 航迹点预处理

在实际航迹点的生成过程中,可能由于多种外在因素导致一些奇异的噪声点.噪声点对于曲线拟合方法有较大的影响,因此剔除不实际存在的噪声点是预处理的一个关键步骤.判断一个航迹点是否属于噪声的依据主要有: 1)航迹点是否落在陆地、岛屿等舰船不可航行的位置; 2)航迹点之中有位置突变情况,舰船速度不可能达到的范围; 3)航迹点经纬度坐标是否出现不可解释的数值,例如大于北纬或者南纬 90 度的情况,则剔除该点,对于大于东经或者西经 180 度的情况,则根据东经西经关系变换到合理坐标.

对于舰船停泊或者小范围移动情况,航迹点集中在某一小区域内(起始点之间距离小于一定阈值),认为这些航迹点为特殊点,后面的处理采用简单的处理方式.采用直线连接航迹点,然后判断直线航线是否穿越陆地,如果有穿越情况,则进行基于海洋陆地分布的中小范围舰船轨迹规划,最后进行舰船路径优化.

### 2.2 基于经验航海线路图的大范围舰船轨迹规划

目前,有一些航海路线规划的小软件,实现从港口到港口的航海路线规划,多数是根据目前在使用的航道设计.这类小软件多用于商业船只的航行路径规划,起到航行预估、辅助规划的作用.但是,这类小软

件仅能给出粗略的航行轨迹, 不能满足需求, 且没有可用的开源代码. 借鉴已有研究, 并结合实际需求, 我们提出将基于经验航海线路图的大范围舰船轨迹的规划作为航线估计的第一步. 我们采用一个公开的经验航海线路图<sup>[6]</sup>用于大范围舰船轨迹的估计, 该经验航海线路图以矢量文件的形式存储, 全球航海线路形成网状结构, 如图 2 所示. 矢量图文件由 4000 多条航路的组成, 每条航线的信息有: 起点、经过点和终点的经纬度坐标、起点和终点的标号、起始点和终止点两点之间的距离、阻力(Impedence)、经验使用频次(Route\_Freq). 该航线航海线路图构成了一个无向图. 其中, 经纬度坐标与航迹点经纬度坐标和海洋陆地分布图在同样的坐标系统下; 起点和终点标号属于航线图的内部属性, 构建网状结构; 起始点和终止点之间的综合距离(记为  $D$ )由距离(记为  $L$ )、阻力(记为  $I$ )和经验使用频次(记为  $F$ )决定. 使用的经验航海图中,  $I$  与  $L$  的关系整体呈现  $L$  越大  $I$  越大, 但是在局部范围内不严格符合递增情况. 航线使用率越高, 其对应的  $F$  越大.  $D$  的计算公式为  $D = \alpha L + \beta I + \gamma(1/F)$ , 其中  $\alpha, \beta, \gamma$  为权重参数. 使用的经验航海图中,  $0 \leq L \leq 109.763$ ,  $0 \leq I \leq 7043.4$ ,  $0 \leq F \leq 906368126$ . 因此, 需要对  $F$  进行处理, 把等于 0 的  $F$  赋值为 1. 选取权重参数取值为  $\alpha = 1, \beta = 0.001, \gamma = 1$ , 这样三个属性中两点间距离  $L$  所占的比例最大,  $D$  的数量级保持与  $L$  一致.

要根据全球航海线路进行最短路径分析, 首先必须将全球航海线路网络抽象化为图论中的网络图, 然后通过网络分析理论来实现航行线路的最短路径分析. 在实际应用中, 采用的全球航海线路矢量图已经是分段的网络图形, 因此很容易抽象化为网络图. 矢量图中的点作为图中的节点, 每一条航线都是一条边, 边的长度设定为起始点和终止点两点之间的距离, 这样即建立了相应的网络拓扑关系. 如果两点之间有航线, 则两节点连通. 原则上, 整个海洋中不存在不连通的节点, 因此, 在预处理阶段, 我们强制采用连通较近节点的方式将所有不连通的航线连通, 对应的综合距离  $D$  设为一个较小值. 由于地球是圆形的, 在预处理阶段, 我们增加东经 180 度和西经 180 度附近的相近节点之间的边, 对应的综合距离  $D$  设为一个较小值, 经过这样的连接处理, 在最短路径规划中就不再需要对东经和西经进行处理. 形成的网络被抽象化为全球航海线路网, 下面简称为航线网.

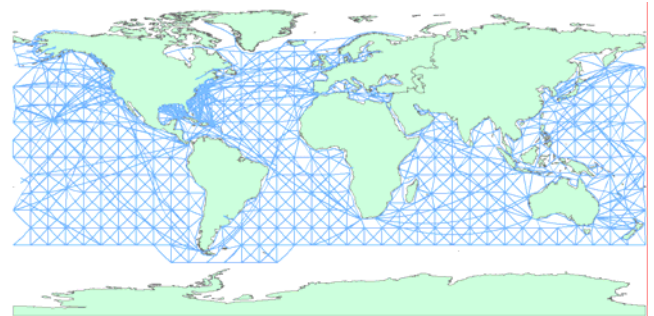


图 2 形成网状结构的全球航海线路与全球大洲分布矢量地图(线对象为全球航线线路图网, 其中面对象为全球陆地分布, 白色无矢量区域即为海洋)

舰船航行轨迹估计的第一步, 是粗略的规划从起始点到终止点的优化路径. 输入的  $N$  个航迹点序列为  $\{P_1, P_2, \dots, P_N\}$ , 我们按顺序依次处理相邻两个航迹点之间的路径规划问题, 即逐个处理点对  $\{P_1, P_2\}, \{P_2, P_3\}, \dots, \{P_{N-1}, P_N\}$ . 分段处理保证规划得到的航线通过所有给定航迹点. 对于给定的两个航迹点  $\{P_i, P_{i+1}\}$ , 首先分别找到航线网中与这两个航迹点最近的两个节点, 并用直线连接航迹点与对应最近节点. 从节点到节点的航线估计即为在网络图中寻找最短路径的问题, 本文采用迪杰斯特拉(Dijkstra)算法<sup>[7][8]</sup>寻找最短路径.

Dijkstra 算法是一种典型的最短路径路由算法, 用于计算一个节点到其他所有节点的最短路径. 主要特点是以起始点为中心向外层层扩展, 直到扩展到终点为止. Dijkstra 算法能得出最短路径的最优解, 但它遍历计算的节点很多, 效率较低. 为了较快速的粗略估计航向, 我们所使用的航线网规模较小、节点数量较少, Dijkstra 算法的速度已经可以满足需求. 当使用的网络较复杂时, 也可以替换为其他的最短路径算法, 目前 GIS 领域也有一些相关的研究, 例如<sup>[9][10]</sup>. Dijkstra 算法的基本思想是, 设置顶点集合  $S$  并不断的作贪心选择来扩充这个集合. 一个顶点属于集合  $S$  当且仅当从源到该顶点的最短路径长度已知. 初始时,  $S$  中仅含有源. 设  $u$  是  $G$  的某一个顶点, 把从源到  $u$  且中间只经过  $S$  中顶点的路称为从源到  $u$  的特殊路径, 并用数组  $Dist$  记录当前每个顶点所对应的最短特殊路径长度. 每次从  $V-S$  中取出具有最短特殊路长度的顶点  $u$ , 将  $u$  添加到  $S$  中, 同时对数组  $Dist$  作必要的修改. 当  $S$  包

含了所有  $V$  中顶点,  $Dist$  就记录了从源到所有其它顶点之间的最短路径长度。

采用基于网络图最短路径粗略的进行路径规划, 优势主要体现在几方面: 1) 航线网的边均位于海洋或者河流上, 不通过大陆和岛屿, 因此不需要额外的航行路线可行性判断(与曲线拟合的方法相比, 这一优势明显, 因为在曲线拟合的方法中增加不穿越陆地的限制条件难以实现); 2) 网络中的最短路径虽然不是实际海洋上的最短路径, 但对实际海洋上最短路径的一个较优路径, 且选择的路线是基于以往舰船航行的经验, 具有较高的合理性; 3) 与其他需要增加海洋陆地限制条件的路径规划方法相比, 基于航线网的最短路径规划已有成熟的算法, 实现快速、稳定、并且耗时较少。

### 2.3 基于海洋陆地分布的中小范围舰船轨迹规划

在上一级的大范围航线规划后, 我们可以得到连接从起始航迹点到终止航迹点之间的一条粗略路径。该路径依次通过输入的稀疏航迹点序列, 但是, 航迹点与其最近航线图节点、以及相距较近的两个节点之间的连接路径并不一定满足不穿越陆地的要求, 且存在不平滑的折线型航线、不合理绕路(与通常舰船航行规则不符)等问题。因此, 我们提出基于海洋陆地分布的舰船轨迹规划, 旨在处理舰船在中小区域内的航行轨迹估计问题, 是更精细的一层路径规划。

中小范围中的舰船轨迹估计没有可以借鉴航行路线可用, 因此需要结合海洋陆地的分布情况以避免穿越陆地的航线。因此, 我们提出采用基于海洋陆地分布的中小范围舰船轨迹规划, 海洋陆地分布图使用海陆分布图(全球大洲分布矢量图)。如图 2 所示, 面对象表示陆地块, 白色无矢量区域即为海洋。目前, 公开使用的全球大洲分布矢量地图有很多, 主要的区别在于分辨率和精度的不同。我们目前使用 ArgGis 和 Qgis 等常用软件所使用的全球大洲分布矢量地图, 实际上, 根据对精度的要求不同, 可使用不同的全球大洲分布矢量地图, 保证该数据与显示数据一致即可。

基于海洋陆地分布的中小范围舰船轨迹规划主要有三个步骤。第一步是全球海陆分布矢量图的预处理, 包括: 1) 分离图中所有组合对象, 即使得每一个块陆地或岛屿都由一个多边形表示; 2) 合并图中临接的对象、及有重叠区域的对象, 注意避免合并著名的大型运河; 3) 面对象的缓冲区, 向外或向内扩展一定距离以生成新的多边形, 保存多边形边界用于舰船航线估计。

第二步是根据全球海量分布图, 判断粗略估计得到的航线中直连航迹点和节点生成的航线是否穿越陆地, 如果没有穿越则保留该段航线不做处理; 如果穿越, 则规划新航线。第三步是新航线的局部优化。

在路径粗估计中, 直接连接起始和终止航迹点形成的航线存在穿越陆地的可能, 当发生穿越陆地上, 则根据其穿越的陆地边界(缓冲区边界)重新进行航线规划。图 3 给出了一个简单的例子, 图中  $A$  为起始航迹点,  $B$  为终止航迹点, 面对象是陆地, 面对象周围的线是陆地缓冲区的边界。从  $A$  点到  $B$  点的直连航线穿越陆地, 曲线是一条合理的航线, 其具体位置有任意种选择, 这里将采用基于陆地缓冲区边界进行中小范围航线估计的方法。

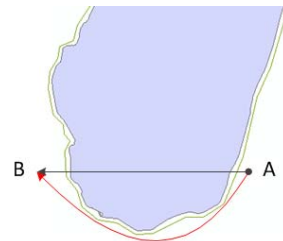


图 3 利用大陆缓冲区边界进行航线规划的示例。A 为起始航迹点, B 为终止航迹点, 面对象是陆地, 面对象周围的线是陆地缓冲区的边界, 从 A 点到 B 点的直连航线穿越陆地, 曲线是一条合理的航线(有任意种选择)。

采用陆地边界进行中小范围航线估计的原因主要有两个: 1) 在小范围内, 经验航线精度不足, 对于航线规划没有作用, 采用陆地缓冲区边界作为航线一种可行的方法, 并且不会引起航线与其他陆地相交的问题, 避免了航线迭代求解中不收敛的问题; 2) 通常情况下, 舰船在海岸线附近航行时, 航线通常是距陆地有一定距离的平滑曲线, 对大陆边界进行缓冲处理得到的边界能模拟出近似的航线, 与局部优化方法协同得到的航向具有一定的合理性。

以图 4 为例具体介绍中小范围航线规划方法。首先, 计算直连航线与大陆缓冲区边界的所有交点, 见图 4(a), 图中红色点 a、b、c、d 即为所有交点。判断选出其中最外侧的两个点, 即点 a 和点 d。然后, 确定航线为: 由点 A 出发, 直线到达点 a, 沿着点 a 到点 d 之间的缓冲区边界走到点 d, 再由点 d 直线走到点 B。不难看出, 按照点 a 到点 d 之间的缓冲区边界朝两个方向走法有两种, 如图 4(b) 中的橙色边界和蓝色边界。

考虑最短路径问题, 选取较短的一部分边界作为航线, 得到图 4(c)中的航线(黑色粗线). 此时, 得到的为初步航线, 是一条较为复杂的折线, 折线上的拐点对应缓冲边界控制点. 最后, 我们对新航线进行局部优化. 从图 4(c)中不难看出, 从点 A 经过点 a 和 d 到点 B 的航线虽然没有经过陆地, 但是其中的很多拐点造成航线复杂、不平滑、无故绕远路, 与通常情况下的舰船航行轨迹不符. 实际上, 图 4(c)中的除了灰色细线以外的拐点, 对于避开陆地并没有意义, 需要去除, 因此, 我们需要进一步对初步航线进行优化. 优化遵循的原则主要有: 1)输入的航迹点不可被改变; 2)如果减少一个拐点(控制点), 不引起航线穿越陆地的情况发生, 则去除该点, 以达到平滑的目的. 根据此原则, 遍历整个航线上所有插入的拐点, 去除符合要求的拐点, 则可以得到一条较简单且平滑的航线, 图 4(d)中的红色航线即为最终得到的局部优化的航线. 这一步是冗余路径优化的过程. 从局部看, 规划得到的路径是由多条线段组成, 但从全局的角度看, 航线具有一定的平滑性, 能够模拟实际航海路线.

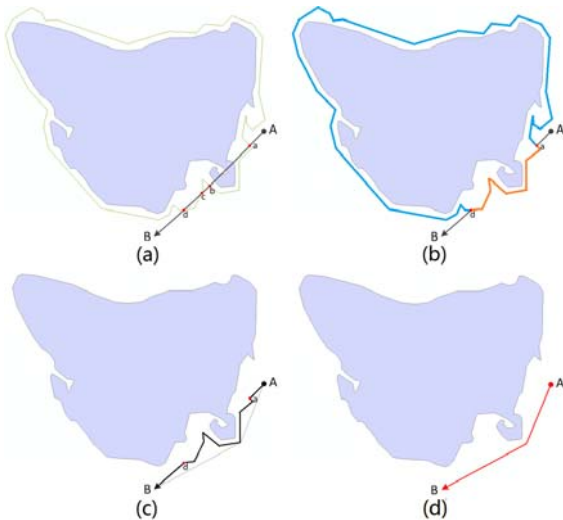


图 4 基于海陆分布的中小范围航线规划方法

## 2.4 舰船路径的全局优化

### 2.4.1 冗余路径优化

经过以上的步骤, 我们得到一条由多条线段组成的舰船路径, 实验发现, 经过局部优化后的航线中仍然存在曲折不平滑的情况, 特别是在两种情况下: 舰船靠近不平滑的陆地边缘航行时(如图 5(a)); 两个航迹点距离较远, 且连接两点的直线通过小岛时(如图 5(b)).

为了进一步优化航线, 对于航线中较长的线段, 进行插值分段, 然后再次进行路径优化. 具体的操作步骤如下: 对于长度大于一定阈值的线段, 等距的插入  $n$  个控制点(例如 20 个点); 针对增加的控制点附近的节点, 按照 2.3 中介绍的局部优化方法进行优化. 相对局部的航线优化, 在控制点去除过程中, 需要注意的问题有: 1)判断控制点是否是输入的航迹点, 输入的航迹点不可去除; 2)需要最后判断人为插入的  $n$  个控制点, 以避免  $n$  个控制点没有起到作用就先被去除. 经过冗余路径优化的处理, 人为添加的  $n$  个控制点中的大部分可被去除, 不会引入无意义的控制点, 经过优化的过的航线更平滑、更合理.

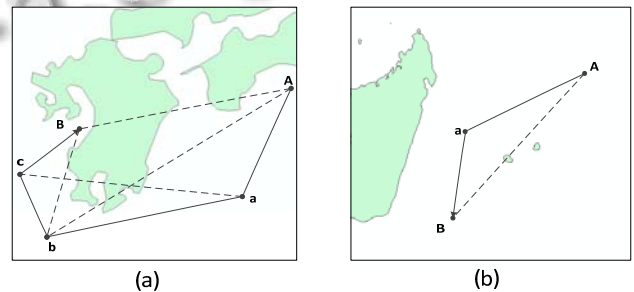


图 5 经过局部优化后的航线中仍然存在曲折不平滑的情况示例(绿色部分为陆地, A点和B点分别为起始航迹点和终止航迹点, a、b、c点为估计航线的控制点, 两图中的控制点根据2.3中的局部优化方法无法处理, 航线仍然存在冗余, 需要进一步优化)

### 2.4.2 舰船航行时间估计

输入的航迹点序列信息中包含了时间信息, 即舰船在一个航迹点位置时的时间是确定的. 我们将根据航线的长度, 粗略估计出舰船到达航线上每一个控制点的大概时刻, 这里不考虑时区改变的问题, 统一采用与输入航迹点时间一样时区的时间. 输入的  $N$  个航迹点序列为  $\{P_1, P_2, \dots, P_N\}$ , 其包含的对应时刻记作  $\{T_1, T_2, \dots, T_N\}$ . 按照时间顺序输入的航点对于得时刻是递增的, 如果不满足递增, 则说明输入错误或者需要调整航迹点的顺序, 可根据实际需求选取处理方法, 这里不做赘述. 根据航迹点序列估计得到的航线控制点序列

表 示 为

$$\{P_1, p_{11}, \dots, p_{1n^1}, P_2, p_{21}, \dots, p_{2n^2}, P_3, \dots, P_{N-1}, p_{(N-1)1}, \dots, p_{(N-1)n^{(N-1)}}, P_N\}$$

其中  $P_1, P_2, \dots, P_N$  是输入的航迹点(时刻已知),  $p_{i1}, p_{i2}, \dots, p_{in^i}$  是第  $i$  和第  $i+1$  个航迹点之间插入航线的控制点(时刻未知),  $n^i$  是第  $i$  和第  $i+1$  个航迹点之间插

入航线的拐点的个数. 时间估计就是分别给出舰船到达插入的所以控制点时的大概时刻.

我们通过  $\{P_i, P_{i+1}\}$  的时间  $\{T_i, T_{i+1}\}$  和  $\{P_i, P_{i+1}\}$  之间航线的长度估计到达  $p_{i1}, p_{i2}, \dots, p_{in'}$  的时刻. 已知  $\{P_i, p_{i1}, p_{i2}, \dots, p_{in'}, P_{i+1}\}$  中每一点的经纬度坐标, 我们计算相邻两点之间的球面距离, 累加算出从  $P_i$  到  $P_{i+1}$  之间的航线总距离  $S_{i,i+1}$ , 总的时间  $T_{i,i+1}$  为  $\{T_i, T_{i+1}\}$  的差. 计算相邻两点间距离占  $S_{i,i+1}$  的比例, 按比例将  $T_{i,i+1}$  分配  $\{P_i, P_{i+1}\}$  之间的每一段航线. 已知起点  $P_i$  的时刻和每一段航线所需时间, 即可计算出到达  $p_{i1}, p_{i2}, \dots, p_{in'}$  的时刻. 其中, 已知地球半径为  $R$  (取平均半径 6371.004 千米), 两个点的经纬度坐标  $\{X_1, Y_1\}$  和  $\{X_2, Y_2\}$  ( $X$  为经度、 $Y$  为纬度, 东经取正、西经取负、北纬取正、南纬取负), 将坐标转换为弧度单位  $\{X_1, Y_1\}$  和  $\{X_2, Y_2\}$ , 则球面距离  $D$  的计算公式为  $D = r * \arccos(C)$ , 其中  $C = \sin(X_1)\sin(X_2) + \cos(X_1)\cos(X_2)\cos(Y_1 - Y_2)$ .

#### 2.4.3 舰船异常行为发现

经过前面的对航线及航行时间的估计, 我们可以大概估计舰船平均速度. 基于对航线、航行时间、船速的分析, 可以对航线合理性进行判断, 也可作为对航线估计结果的验证步骤. 目前, 检测到异常行为时, 仅给出提示, 不做处理, 可根据实际需求具体确定对异常情况的处理. 合理性分析主要包含以下方面:

1) 点之间的时间与球面距离(按经纬度坐标计算)的比值是否在合理范围内, 如果不合理, 说明输入航迹点可能存在问题, 不做其他合理性分析.

2) 估计出的平均船速是否远大于舰船的最高速度, 如果超出, 则说明估计得航线可能存在绕远问题. 其中“远大于”的可定义为大于舰船的最高速度的 3-4 倍, 因为船速的估计是粗略的, 允许存在误差, 另外, 船速可能受到洋流、季风等因素的影响.

3) 估计出的平均船速是否过低, 如果过低, 可能由于舰船在两个航迹点发生过停留, 或者实际航行走较长的航线, 与估计出的航线有较大差别. 由于输入的航迹点较为稀疏, 这类情况发生的频率较高.

## 3 实验设计与结果

### 3.1 实验设计

随机选了 100 对点对(经纬度坐标数据见<sup>[11]</sup>), 点对之间的直线均与陆地相交, 不能采用直接连接点生

成的航线方法. 点的经度记为  $X$ , 纬度记为  $Y$ , 两个点之间的经度差记为  $dX$ , 纬度差记为  $dY$ . 针对  $dX$  和  $dY$  满足不同条件的情况, 选取一定数目的点对, 分为 4 种条件:  $dX < 10 \& dY < 10$ ;  $dX < 50 \& dY < 50$ ;  $dX < 100 \& dY < 100$ ;  $dX < 180 \& dY < 180$ . 其中, 东经为正, 西经为负, 北纬为正, 南纬为负. 考虑到地球是一个球形, 东经和西经在 180 度处会合, 两点经度差计算时, 按照较短的一边计算. 起点和终点时间不作为实验范围, 只需保证终点时间晚于起点时间、估算出的航线上某些点的到达时刻按顺序增大即可.

### 3.2 实验结果

我们将随机选取的 100 组起始点与终止点坐标输入软件, 经过计算得到 100 条航线. 图 6 给出了两个较好的航线估计例子, 图 7 则是出现了不平滑的航线的例子. 经过人工判读, 在 100 条航线中, 有 6 条航线出现了较明显的折线. 按照大陆边界的缓冲区进行中小范围航线规划可能造成航线有一些的明显折线段, 由于航线优化顺序进行, 可能造成有一部分折线航线形航线不能被优化, 从而出现了图 7 中示例的情况. 另外, 观察实验用图发现, 目前使用的经验航海线路图与全球海陆分布图中有一些细节的地方存在经验航线穿越陆地的情况, 可能导致航线穿越陆地发生, 这些问题主要是由于地图数据精度不匹配造成的, 可以通过精细化地图和经验航线数据、增加算法后处理步骤等方法解决.

根据实验结果, 提出的算法能较好的完成基于航迹点的航线估计任务, 估计出的航线几乎不穿越陆地, 估计出的航线大部分满足平滑要求.



图 6 估计航线较好结果示例(曲线为估计的航线)

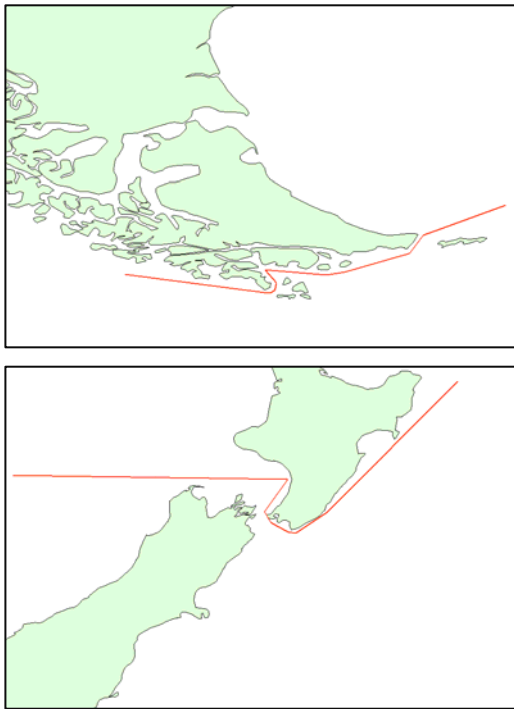


图 7 估计航线较差结果示例(曲线为估计的航线)

#### 4 结语

本文旨在解决基于稀疏航迹点的航线估计,区别于前期航线规划,航迹点之间的距离通常远小于航线规划问题中的起始点之间的距离,通常是基于一系列点的航向估计,因此航线估计受到更多因素的影响,对于估算速度的要求也相对较高。有针对性的,我们提出了由粗到细的快速的航线估计算法。实验结果表明,提出的算法能较好的完成航线规划任务。同时,提出的算法也可用在航海前期的航线规划任务中,实现较细致的、快速的航线规划,减少人为规划的主观因素影响、提高效率。

本文提出的算法可以满足基于离散航迹点的船舶路径估计要求,但仍然有很多需要进一步研究和完善的方面,例如:综合考虑舰船大小、吃水深度、航速、动力方式与速度、海洋中海水深度、礁石分布、洋流方向等因素的路径规划,难点在于海洋信息的收集、汇总、数据库设计、全局规划策略、以及合适优化算法选择;基于地球经纬度坐标的最短路径的优化选取问题。目前方法中,在大范围路径规划中采用了最短

路径的规划的策略,但在基于海洋陆地分布的中小范围舰船轨迹规划中,对最短路径的关心较少,在下一步的研究中,将对基于地球经纬度坐标的最短路径问题进行研究;尺度自适应的曲线平滑技术。目前所采用的舰船路径估计算法中,路径优化算法采用了较为直观的方法,下一步的研究中,我们将关注尺度自适应的曲线平滑技术,针对不同海域大小、不同情况,实现与实际舰船航线更相似的路径估计。

#### 参考文献

- 1 Fagerholt K. Designing optimal routes in a liner shipping problem. *Maritime policy & management*, 2004, 31(4): 259-268.
- 2 Bijlsma SJ. On the applications of the principle of optimal evolution in ship routing. *Journal of the Institute of Navigation*, 2004, 51(2): 93-100.
- 3 李源惠,潘明阳,吴娴.基于动态网格模型的航线自动生成算法. *交通运输工程学报*, 2007, 7(3): 34-39.
- 4 张立华,朱庆,刘雁春,李树军.电子海图平台下的航线自动设计方法. *大连海事大学学报*, 2007, 33(3): 109-112
- 5 郁振伟,刘莹.浅析航线选择中的改进最短路径算法. *航海工程*, 2007, (3): 86-88.
- 6 <http://geocommons.com/overlays/25>
- 7 Dijkstra EW. A note on two problems in connexion with graphs. *Numerische Mathematik*, 1959, 1(1): 269-271.
- 8 Thomas HC, Charles EL, Ronald LR, Clifford S. *Introduction to Algorithms*. MIT Press and McGraw-Hill, 2001: 595-601.
- 9 乐阳, 龚健雅. Dijkstra 最短路径算法的一种高效率实现. *武汉测绘科技大学学报*, 1999, 24(3): 209-212.
- 10 Fan D K, Shi P. Improvement of Dijkstra's algorithm and its application in route planning. *The 7th International Conference on Fuzzy Systems and Knowledge Discovery*, 2010, 4: 1901-1904.
- 11 <http://dl.vmall.com/c0unbyg9pt>