

基于 Vondrak 滤波和三次样条插值的船舶轨迹修复研究*

刘立群^{1,2,3} 吴超仲^{1,2,3} 褚端峰^{1,2,3}▲ 陈志军^{1,2,3} 孙川^{1,2,3}

(1.武汉理工大学国家水运安全工程技术研究中心;2.武汉理工大学智能交通系统研究中心;
3.武汉理工大学水路公路交通安全控制与装备教育部工程研究中心 武汉 430063)

摘要 船舶航行轨迹是船舶的位置和时间的记录序列,对分析船舶的航行状态、水上交通事故预测等具有重要的意义。为了修正 AIS 数据传输中断等原因导致船舶位置、时间更新数据不正确,解决船舶轨迹的缺失问题开展了船舶轨迹修复的研究,设计了分布式船舶轨迹修复模型,运用 Vondrak 滤波对船舶航行轨迹进行平滑的预处理,再通过三次样条插值法分别对船舶经度、纬度信息进行修复,最后将经度、纬度信息合并得到修复后的船舶轨迹,并利用 Matlab 对修复方法的效果进行仿真验证。结果表明,其算法误差为 6.01×10^{-5} ,能够准确地修复船舶轨迹。为基于船舶航行轨迹数据的相关研究提供相对准确的数据支持。

关键词 AIS;样条插值;船舶轨迹;轨迹修复;Vondrak 滤波

中图分类号:U675.6 **文献标志码**:A **doi**:10.3963/j.issn 1674-4861.2015.04.016

A Study of Ship Trajectory Restoration Based on Vondrak Filtering and Cubic Spline Interpolation

LIU Liqun WU Chaozhong CHU Duanfeng CHEN Zhijun SUN Chuan

(1.National Engineering Research Center for Water Transport Safety, Wuhan 430063,China;
2.Intelligent Transportation Systems Research Center of Wuhan University of Technology, Wuhan 430063,China;
3. Engineering Research Center for Transportation Safety, Ministry of Education, Wuhan 430063,China)

Abstract: Ship trajectories record the ship locations and times, which are significant for analyzing the navigation states and projecting maritime accidents. In order to correct the data errors of ship location and times due to AIS (automatic identification system) data transmission interruption and compensate the missing data of ship trajectories, this study proposed a ship trajectory restoration method. The study developed a distributive model of ship trajectories restoration by using Vondrak Filtering to smooth the navigation trajectories, and correcting the latitude and longitude information by using cubic spline interpolation, which formed the ship trajectories. The proposed restoration methods were verified by Matlab under simulation. The results show that the algorithm error is 6.01×10^{-5} and the proposed method can accurately restore ship trajectories.

Key words: AIS; spline interpolation; ship trajectory; ship trajectory restoration; Vondrak Filtering

0 引言

AIS 是船舶自动识别系统的简称,由岸基设施和船载设备共同组成,是 1 种集网络技术、现代

通信技术、计算机技术、电子信息显示技术为一体的数字助航设备和系统^[1-3]。AIS 是由舰船、飞机的敌我识别器发展而来,利用 GPS 定位系统,将船位、船速、改变航向率以及航向等一些船舶动态

收稿日期:2015-05-11 修回日期:2015-07-22

* 国家自然科学基金项目(批准号:51105286)、中央高校基本科研业务费专项资金(批准号:2014-IV-137)资助

第一作者简介:刘立群(1990—),硕士研究生,研究方向:智能交通系统、交通数据挖掘,E-liuliquan_whut@163.com

▲通信作者:褚端峰(1983—),博士,副研究员,研究方向:智能交通系统、交通数据挖掘,E-chudf@whut.edu.cn

信息,以及船名、吃水、呼号和危险运输品等船舶静态信息通过甚高频(VHF)向附近水域船舶及岸基广播,使岸基以及邻近船舶能及时地掌握附近海面的所有船舶动静态信息,可以立刻互相通话进行协调,采取必要时的避让措施及行动,对船舶的航行安全有很大作用^[4-5]。

在 2000 年修订的 SOLAS 公约第 V 章“航行安全及其相关规则”中,详细的说明了车载 AIS 的强制安装要求规则。自公约规定以后,AIS 系统在航海事业中获得了快速、广泛的发展。随着 AIS 的发展,其在各个方面都得到了深入的研究。但是,由于岸上以及船上人员对 AIS 设备错误的操作、AIS 与岸基间的信息传输故障、AIS 设备自身随机性故障或者人为不当维护问题等主客观因素,造成了 AIS 数据出现不正确或者缺失等问题^[6-7]。Vondrak 滤波法是由捷克天文学家提出的 1 种平滑方法。这种方法对有一定规律的散点轨迹图也有一定的平滑作用。插值法也可以称为“内插法”,利用已知函数 $f(x)$ 在某区间若干点的函数值,求出适当的特定函数。在这些区间点上取 $f(x)$ 的值作为已知值,而在区间的其他点上,利用特定函数求值并作为函数 $f(x)$ 的近似值,即为插值法。在全球信息化的背景下,随着计算机技术的迅猛发展,插值法在造船、航空、航海等领域得到了更为广泛的发展^[8]。

位置和时间的数据是 AIS 数据的主要部分,也是描述船舶航行轨迹主要的数据来源。笔者基于 Vondrak 滤波和三次样条插值方法,针对船舶轨迹不完整或者轨迹明显错误的问题,建立分布式船舶轨迹修复模型,对船舶轨迹进行平滑处理并修复航行轨迹以获得更为准确、完整的船舶轨迹信息。实验仿真表明,本研究建立的模型能够有效地修复船舶的航行轨迹。

1 轨迹修复模型的研究与设计

1.1 模型结构设计

根据 AIS 的数据类型,本研究采用分布式的轨迹修复的模型。对船舶轨迹进行修复,其结构见图 1。

首先,经纬度和时间数据来源于 AIS 信号,通过 Vondrak 滤波进行数据的平滑处理,去除 AIS 信号中有明显偏差的位置信息。通过预处理减少了有明显偏差的位置信息,经纬度信息再通过三次样条插值方法进行修复,得到更为准确的

经纬度与时间对应的轨迹。最后将时间-经度与时间-纬度的轨迹图合并得到修复后的船舶航行轨迹图^[9]。

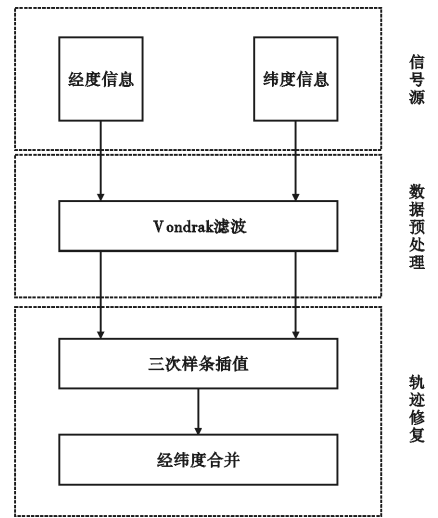


图 1 船舶轨迹修复模型图

Fig.1 Ship trajectory restoration model diagram

1.2 数据预处理

对于 1 时间-经度序列 (t_i, x_i) , 其中 $i = 1, 2, \dots, N$, t_i 为时间, x_i 该时间对应的经度。Vondrak 的基本假设是

$$Q = F + \lambda^2 S = \min \quad (1)$$

$$\text{其中: } F = \sum_{i=1}^N p_i (y'_i - y_i)^2 \quad (2)$$

$$S = \int_r^s [\varphi^m(x)]^2 dx \quad (3)$$

其中: y'_i 为测量数据平滑后的经度值; p_i 为测量数据的权重; F 为 Vondrak 滤波的平滑度; S 为 Vondrak 滤波的拟合度; $\epsilon = 1/\lambda^2$ 为平滑系数,平滑系数的数值决定了修复数据曲线的平滑程度。

当 $\lambda^2 \rightarrow \infty$ 时,要使式(1)达到最小值,必须使 $S \rightarrow 0$,此时得到一条十分光滑的曲线,成为“绝对平滑”;当 $\lambda^2 \rightarrow 0$ 时,要使式(1)达到最小值,必须使 $F \rightarrow 0$,此时得到的是 1 条很“毛糙”的曲线,平滑值接近测量值,称为“绝对拟合”。Vondrak 平滑方法就是寻找 1 条介于绝对平滑和绝对拟合之间的 1 条曲线,曲线的特性取决于 $\epsilon = 1/\lambda^2$ 的大小。 ϵ 的选取根据实际经验与具体情况而定,本文分析得到比较合理的平滑因子 $\epsilon = 425$ ^[10]。

Vondrak 滤波函数通过拉格朗日多项式的形式表示,相邻的每四组数据构成 1 个三次拉格朗日多项式,用该式来表示中间的 2 个平滑值。以此类推,可得有惟一 1 组平滑值的线性方程组(给

定相应的 ϵ 值)。同理, Vondrak 滤波也可平滑时间-纬度航行轨迹。

1.3 三次样条插值模型

设 t_i 为时间, x_i 为经度, y_i 为纬度^[11]。 $S(t)$ 在节点 t_i 处的二阶导数值分别为 M_i , 即

$$S''(t_i) = M_i \quad (4)$$

因为 $S(t)$ 在每个区间 $[t_i, t_{i+1}] (i=0, 1, \dots,$

$$S(t) = -M_i \frac{(t - t_{i+1})^3}{6h_i} + M_{i+1} \frac{(t - t_i)^3}{6h_i} + (x_i - \frac{M_i h_i^2}{6}) \frac{t_{i+1} - t}{h_i} + (x_{i+1} - \frac{M_{i+1} h_i^2}{6}) \frac{t - t_i}{h_i} \quad (6)$$

式中 $t \in [t_i, t_{i+1}] (i=0, 1, \dots, n-1)$; M_i 为未知参数。为了确定它们, 对 $S(t)$ 求导得

$$S'(t) = -\frac{M_i}{2h_i}(t - t_{i+1})^2 + \frac{M_{i+1}}{2h_i}(t - t_i)^2 + \frac{x_{i+1} - x_i}{h_i} - \frac{M_{i+1} - M_i}{6}h_i \quad (7)$$

因此

$$S'(t_i + 0) = -\frac{h_i}{3}M_i - \frac{h_i}{6}M_{i+1} + \frac{x_{i+1} - x_i}{h_i} (i=0, 1, \dots, n-1) \quad (8)$$

用下标 $i-1$ 取代 i 得到 $S(t)$ 在区间 $[t_{i-1}, t_i] (i=1, 2, \dots, n)$ 上的表达式, 从而得

$$S'(t_i - 0) = \frac{h_{i-1}}{6}M_{i-1} + \frac{h_{i-1}}{3}M_i + \frac{x_i - x_{i-1}}{h_{i-1}} (i=0, 1, \dots, n) \quad (9)$$

利用 $S'(t_i + 0) = S'(t_i - 0)$ 可得

$$\mu_i M_{i-1} + 2M_i + \lambda_i M_{i+1} = d_i \quad (10)$$

式中 $\mu_i = \frac{h_{i-1}}{h_{i-1} + h_i}$; $\lambda_i = \frac{h_i}{h_{i-1} + h_i}$; $d_i = \frac{6}{h_{i-1} + h_i}(\frac{x_{i+1} - x_i}{h_i} - \frac{x_i - x_{i-1}}{h_{i-1}}) = 6f[t_{i-1}, t_i, t_{i+1}]$

方程组含有 $n+1$ 个未知量, 但却只有 $n-1$ 个方程, 因此需要边界条件补充另外的 2 个方程。根据第一类边界条件, 式(5)和式(6)中的 i 分别取 1 和 n 得端点方程

$$2M_0 + M_1 = \frac{6}{h_0}(f[t_0, t_1] - x_0') \quad (11)$$

$$M_{n-1} + 2M_n = \frac{6}{h_{n-1}}(x_n' - f[t_{n-1}, t_n])$$

$$\text{令 } \lambda_0 = 1, d_0 = \frac{6}{h_0}(f[t_0, t_1] - x_0'), \mu_n = 1, d_n'$$

$= \frac{6}{h_{n-1}}(x_n' - f[t_{n-1}, t_n])$, 则将式(7)与式(8)联立可得关于参数 M_0, M_1, \dots, M_n 的 $n+1$ 阶线性方程组, 其三弯矩矩阵方程为

$$\begin{pmatrix} 2 & \lambda_0 & & & & \\ \mu_1 & 2 & \lambda_1 & & & \\ & \ddots & \ddots & \ddots & & \\ & & \mu_{n-1} & 2 & \lambda_{n-1} & \\ & & & \mu_n & 2 & \end{pmatrix} \begin{pmatrix} M_0 \\ M_1 \\ \vdots \\ M_{n-1} \\ M_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} d_0 \\ d_1 \\ \vdots \\ d_{n-1} \\ d_n \end{pmatrix} \quad (12)$$

$n-1$) 上是分段三次多项式, 故 $S'(t_i)$ 在 $[t_i, t_{i+1}]$ 上是线性函数, 可表示为

$$S'(t_i) = M_i \frac{t_{i+1} - t}{h_i} + M_{i+1} \frac{t - t_i}{h_i} \quad (5)$$

式中: $h_i = t_{i+1} - t_i$ 。对 $S'(t_i)$ 积分 2 次并利用 $S'(t_i) = x_i$ 及 $S(t_{i+1}) = x_{i+1}$, 可定出积分常数, 于是得三次样条表达式

根据三弯矩矩阵可求出 M_0, M_1, \dots, M_n 的值, 即可求出时间-经度轨迹的三次样条插值表达式。同理, 可求出时间-纬度轨迹的三次样条插值表达式。将时间-经度轨迹与时间-纬度轨迹合并即可得到船舶航行轨迹。

2 仿真计算与分析

文中利用 AIS 历史数据, 在 Matlab 环境下对上述的算法进行仿真^[12]。首先, 将船舶轨迹的时间格式改为 [ss] 的格式, 并以船舶轨迹的第 1 个点为 0 建立时间轴。其次, 通过 Vondrak 滤波算法分别对 AIS 的经纬度数据进行平滑处理。最后, 通过三次样条插值算法分别对时间-经度、时间-纬度的位置信息进行插值修复, 并将经度、纬度的修复结果合并为最终的修复轨迹。

仿真验证提取 AIS 数据的经度、纬度、时间数据作为原始数据, 取其中的 50 条轨迹作为原始轨迹点, 将每 1 条轨迹截选 1 段轨迹作为原始轨迹, 在每条轨迹上随机扣除 6 个点后分别采用上述船舶轨迹修复模型进行数据的修复。AIS 数据格式见表 1。

提取船舶 AIS 数据中的时间、经度、纬度信息作为样本数据, 现取其中 1 条轨迹为例进行分析说明, 时间-经度原始轨迹点、时间-纬度原始轨迹点、船舶航行原始轨迹点绘制如图 2~4 所示。

表 1 AIS 数据图表
Tab.1 AIS figure table

ARCHIVE_TIME	LON	LAT	SPEED	COURSE	TRUE_HEAT	STATUS	VDESC	AIS_TYPE	ETA	SHIP_TYPE
2014-08-26 10:27:24AM	114.271512	30.537752	3.8	203.1	NULL	NULL	NULL	B	NULL	NULL
2014-08-26 10:27:34AM	114.271448	30.537615	3.4	201.6	NULL	NULL	NULL	B	NULL	NULL
2014-08-26 10:27:44AM	114.271393	30.537487	3.2	205.4	NULL	NULL	NULL	B	NULL	NULL
2014-08-26 10:28:06AM	114.271283	30.537232	2.9	192.9	NULL	NULL	NULL	B	NULL	NULL
2014-08-26 10:28:14AM	114.271210	30.537108	2.9	197.3	NULL	NULL	NULL	B	NULL	NULL
2014-08-26 10:28:45AM	114.271073	30.536728	2.7	200.8	NULL	NULL	NULL	B	NULL	NULL
2014-08-26 10:28:54AM	114.271032	30.536622	2.5	196.6	NULL	NULL	NULL	B	NULL	NULL
2014-08-26 10:29:05AM	114.270997	30.536518	2.3	198.1	NULL	NULL	NULL	B	NULL	NULL
2014-08-26 10:29:37AM	114.270895	30.536218	2.2	198.4	NULL	NULL	NULL	B	NULL	NULL
2014-08-26 10:29:38AM	114.270895	30.536218	2.2	198.4	NULL	NULL	NULL	B	NULL	NULL
2014-08-26 10:29:43AM	114.270855	30.536123	2.2	200.3	NULL	NULL	NULL	B	NULL	NULL
2014-08-26 10:29:54AM	114.270810	30.536022	2.2	202.5	NULL	NULL	NULL	B	NULL	NULL
2014-08-26 10:30:03AM	114.270760	30.535915	2.3	205.5	NULL	NULL	NULL	B	NULL	NULL
2014-08-26 10:30:04AM	114.270760	30.535915	2.3	205.5	NULL	NULL	NULL	B	NULL	NULL
2014-08-26 10:30:14AM	114.270697	30.535805	2.4	207.3	NULL	NULL	NULL	B	NULL	NULL
2014-08-26 10:30:25AM	114.270633	30.535690	2.6	203.8	NULL	NULL	NULL	B	NULL	NULL
2014-08-26 10:30:36AM	114.270567	30.535563	2.8	205.3	NULL	NULL	NULL	B	NULL	NULL
2014-08-26 10:30:45AM	114.270502	30.535427	3.0	202.9	NULL	NULL	NULL	B	NULL	NULL
2014-08-26 10:30:46AM	114.270502	30.535427	3.0	202.9	NULL	NULL	NULL	B	NULL	NULL

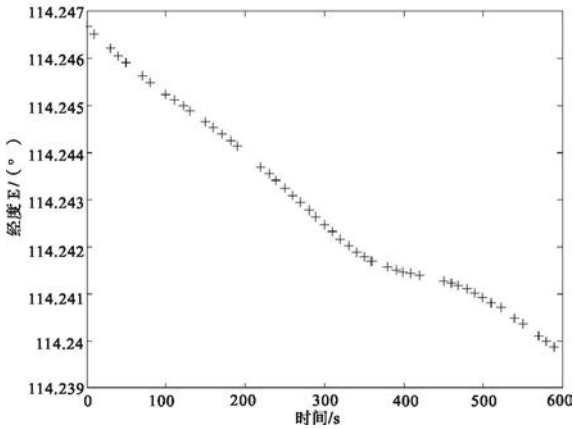


图 2 时间-经度原始轨迹图

Fig.2 Time-Longitude original trajectory diagram

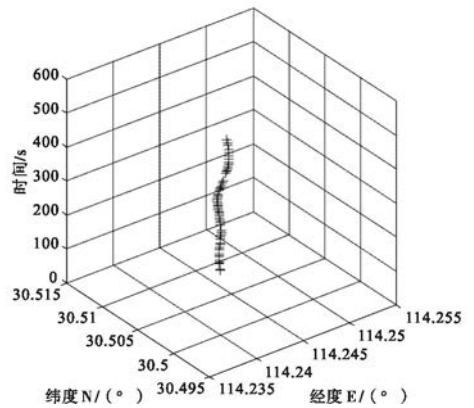


图 4 船舶航行原始轨迹图

Fig.4 The ship original trajectory navigation diagram

将每段轨迹随机抽取其中 6 个点作为修复点,6 个点的数据信息见表 2。

利用上述模型分别对时间-经度原始轨迹、时间-纬度原始轨迹、船舶航行原始轨迹进行修复处理,结果如图 5~图 7。

图中“+”为原始轨迹,“*”为经过上述模型修复后的轨迹点,从图中可以看出经过修复处理后的时间-经度轨迹的精度要低于时间-纬度轨迹的精度。可能由于时间-经度的轨迹线性度要低于时间-纬度的线性度的原因。所以此模型对线性度高的轨迹修复的精度要高于线性度低的轨迹修复精度。对上述方法进行误差分析,误差公式分别为

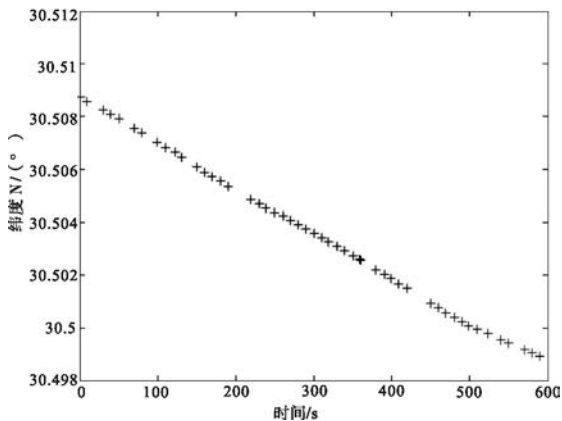


图 3 时间-纬度原始轨迹图

Fig.3 Time-Latitude original trajectory diagram

表2 AIS 取样点坐标
Tab.2 AIS sample point coordinates

轨迹修复点	1	2	3	4	5	6
时间 T/s	30	122	239	340	460	523
经度 E/(°)	114.246205	114.245005	114.243402	114.241893	114.24124	114.240708
纬度 N/(°)	30.508255	30.506642	30.504545	30.502923	30.500745	30.49979

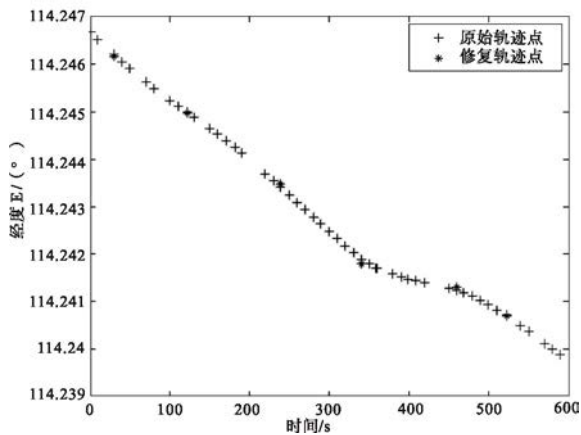


图5 时间-经度轨迹修复图
Fig.5 Time-Longitude trajectory restoration diagram

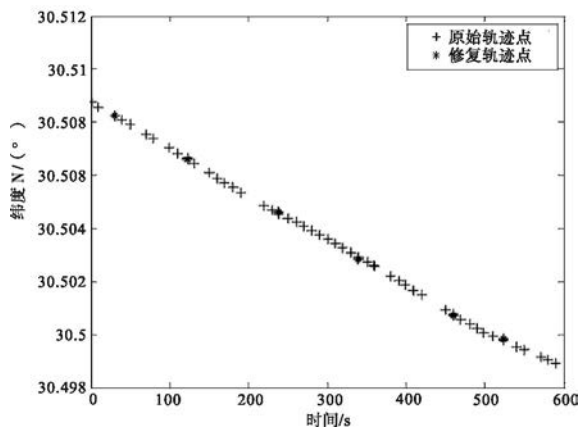


图6 时间-纬度轨迹修复图
Fig.6 Time-Latitude trajectory restoration diagram

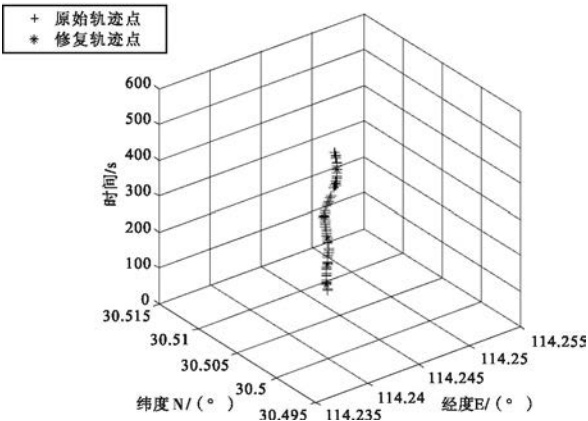


图7 船舶轨迹修复图
Fig.7 Ship trajectory restoration diagram

$$\delta = \sum_{i=1}^n |x - x_i| / n \quad (13)$$

$$\delta = \sum_{i=1}^n |y - y_i| / n \quad (14)$$

$$\delta = \sum_{i=1}^n \sqrt{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2} / n \quad (15)$$

其中式(13)~式(15)分别为经度误差公式、纬度误差公式、船舶轨迹误差公式,根据上述误差公式求得算法的轨迹修复误差见表3。

表3 修复结果误差表
Tab.3 The errors table for restoration results

误差	经度误差	纬度误差	轨迹误差
误差值/(°)	4.82×10^{-5}	3.27×10^{-5}	6.01×10^{-5}

由表3可知,本文算法的轨迹修复数据与实际数据相比,误差值为 6.01×10^{-5} ,因此本文算法具有较好的轨迹修复特性。

3 结束语

笔者对基于 Vondrak 滤波和三次样条插值的船舶轨迹的分布式修复模型并进行了验证和分析。原始数据经过 Vondrak 滤波后,达到了平滑时间-经度轨迹和时间-纬度轨迹的目的。通过三次样条插值的时间-经度轨迹和时间-纬度轨迹修复并将两条轨迹信息合并后,得到了修复后的船舶航行轨迹,仿真结果表明,笔者所设计的分布式模型能够较好的修复船舶轨迹,为基于船舶轨迹等相关的研究提供一定的数据基础。但是,船舶轨迹修复未考虑速率、航向信息,在以后的工作中,会对船舶轨迹修复进行深入研究,并考虑基于速率、航向信息建立更复杂的模型从而使修复工作更加完整、准确。

参考文献

[1] 邹秋花. 基于模糊综合函数的 AIS 与雷达信息融合研究[D].大连:大连海事大学,2013.
ZOU Qiuhua. Study on AIS and Radar Information fusion based on fuzzy comprehensive function[D]. Dalian:Dalian Maritime University, 2013.

[2] 于俊逸,陈伟,刘建,等. 内河航运 VTS 与 AIS 信息融合关键技术研究[J]. 交通信息与安全,2013, 31(6):113-118.
YU Junyi, CHEN Wei, LIU Jian, et al. Key tech-

- nology for VTS and AIS information fusion in the inland waterway[J]. Journal of Transport Information and Safety, 2013,06:113-118. (in Chinese)
- [3] 林伟珣. 数据挖掘技术在海上交通特征分析中的应用研究[D]. 厦门:集美大学,2011.
LIN Weixun. Application of data mining technology in analysis of marine traffic characteristics[D]. Xiamen: Jimei University, 2011.
- [4] 邵哲平, 孙腾达, 潘家财, 等. 基于 ECDIS 和 AIS 的船舶综合信息服务系统的开发[J]. 中国航海, 2007,71(2):30-33.
SHAO Zheping, SUN Tengda, PAN Jiakai, et al. Development of the Integrated Vessel Information Service System Based on ECDIS and AIS[J]. Navigation of China, 2007,71(2):30-33. (in Chinese)
- [5] FLEMING L Y M, RAU Y C. Detection of ship tracks in AVHRR cloud imagery with neural networks[J]. International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS), 1994,31(3):1401-1403.
- [6] REN Zhenzhen, HUANG Jianshe. The information reconstruction system of VDR & AIS data fusion [J]. IEEE Computer Society, 2010, 47(20):181-183.
- [7] 徐铁, 蔡奉君, 胡勤友, 等. 基于卡尔曼滤波算法船舶 AIS 轨迹估计研究[J]. 现代电子技术, 2014, 37(5):97-100, 104.
XU Tie, CAI Fengjun, HU Qinyou, et al. Research on estimation of AIS vessel trajectory data based on kalman filter algorithm [J]. Modern Electronic Technique, 2014, 37(5):97-100, 104. (in Chinese)
- [8] 权双燕, 曹阳. 插值法的应用与研究[J]. 科技信息, 2007, 23(36):413-414.
QUAN Shuangyan, CAO Yang. Interpolation method research and application[J]. Science Information, 2007, 23(36):413-414. (in Chinese)
- [9] 曹梦成, 戴吾蛟, 周晓卫. 基于 Vondrak 滤波的 GPS 周跳探测与修复[J]. 测绘信息与工程, 2006, 31(5):20-21.
CAO Mengzhen, DAI Wujiao, ZHOU Xiaowei. Application of Vondrak filtering detecting and repairing GPS cycle Clips [J]. Journal of Geomatics, 2006, 31(5):20-21. (in Chinese)
- [10] 何大林, 袁海波, 董绍武. GPS 时间比对数据的 Vondrak 平滑和三次样条插值处理[J]. 宇航计测技术, 2010, 30(1):7-10.
HE Dalin, YUAN Haibo, DONG Shaowu. Processing for GPS time comparative data with Vondrak smoothing and cubic spline Interpolation[J]. Journal of Astronautic Metrology and Measurement, 2010, 30(1):7-10. (in Chinese)
- [11] 张小江, 高秀华. 三次样条插值在机器人轨迹规划应用中的改进研究[J]. 机械设计与制造, 2008, 45(9):170-171.
ZHANG Xiaojiang, GAO Xiuhua. The research on the cubic splines in robot's trajectory planning [J]. Machinery Design & Manufacture, 2008, 45(9):170-171. (in Chinese)
- [12] 张德丰. MATLAB 数值分析与仿真案例[M]. 北京:清华大学出版社, 2011.
ZHANG Defeng. Numerical analysis and simulation Cases [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2011. (in Chinese)