doi:10.19306/j. cnki. 2095-8110. 2025. 03. 005

一种新型的水下地磁/声学/惯性融合导航算法

丁俊迪1,赵万龙1,刘功亮1,孟维晓2

(1. 哈尔滨工业大学(威海)信息科学与工程学院,山东威海 264200;2. 哈尔滨工业大学电子与信息工程学院,哈尔滨 150000)

摘 要:现有地磁匹配算法在水下应用中仍存在定位精度低、误匹配率高的问题。为进一步提高 地磁匹配的水下定位精度,提出了一种新型的水下地磁/声学/惯性融合导航算法。首先,通过定 期更新的声学测距信息对惯导指示轨迹进行刚性变换,得到粗匹配轨迹;然后,利用改进遗传算法 和禁忌搜索算法对轨迹进行重构和更新,并通过卡尔曼滤波进行融合和修正,得到精匹配轨迹。 仿真结果表明,所提出的算法相较于传统的 ICCP 算法和遗传算法能够有效提高定位精度,并且进 一步降低算法的复杂度。在所提出的算法中,声学测距信息辅助发挥了提高定位精度和计算速度 的作用。

关键词:地磁匹配;遗传算法;声学测距;水下定位;卡尔曼滤波;禁忌搜索
中图分类号:V249.3
文献标志码:A
文章编号:2095-8110(2025)03-0050-09

A novel underwater geomagnetic/acoustic/inertial fusion navigation algorithm

DING Jundi¹, ZHAO Wanlong¹, LIU Gongliang¹, MENG Weixiao²

(1. School of Information Science and Engineering, Harbin Institute of Technology(Weihai),

Weihai, Shandong 264200, China;

2. School of Electronic and Information Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150000, China)

Abstract: As the existing geomagnetic matching algorithms still face the problems of low positioning accuracy and high false match rate in underwater applications, a novel underwater geomagnetic/acoustic/inertial fusion navigation algorithm is proposed to further improve the underwater positioning accuracy of geomagnetic matching. First, the inertial navigation indication trajectory is rigidly transformed by regularly updated acoustic range information to obtain a coarse matching trajectory. Then, the improved genetic algorithm and taboo search algorithm are used to reconstruct and update the trajectory, and the Kalman filter is used for fusion and correction to obtain a precise matching trajectory. The simulation results show that the proposed algorithm can effectively improve the positioning accuracy compared to the traditional ICCP algorithm and genetic algorithm, and further reduce the algorithm can play a role in improving the positioning accuracy and calculation speed in the proposed algorithm.

收稿日期: 2024-09-15;修订日期: 2024-11-24

基金项目:国家自然科学基金(62101158);山东省自然科学基金(ZR2024MF035, ZR2021QF004);威海市科研创新基金(2022KY-CXJJ13)

作者简介:丁俊迪(2003—),男,主要从事水下定位与导航方面的研究。

通信作者:赵万龙(1988—),男,博士,副教授,主要从事室内定位、水下定位与导航、海洋信息感知等方面的研究。

Key words: Geomagnetic matching; Genetic algorithm; Acoustic ranging; Underwater positioning; Kalman filtering; Taboo search

0 引言

地磁匹配导航定位是导航定位技术体系中的 重要技术手段之一,具有全天候、隐蔽性好及无误 差积累等优势,能够在地下、水下等复杂定位场景 中提供无源被动的技术解决方案^[1-2]。然而,仅依靠 地磁数据进行定位匹配的精度十分有限。例如,美 国国家航空航天局公布的数据显示,纯地磁导航在 地面和空中的定位精度仅有 30 m(CEP),水下仅有 500 m(CEP)^[3]。因此,如何利用其他定位源辅助 地磁,进一步提升水下导航定位精度,已成为该领 域的一个研究热点。由于声学测距在实现高定位 精度方面具有较大优势,地磁/声学/惯性融合定位 导航成为了一个重要的研究方向。

目前,有关地磁匹配导航定位的算法主要有地磁 轮廓匹配(magnetic contour matching, MAGCOM)算 法和最近等值线迭代(iterative closest contour point, ICCP)算法^[4]。两者都是利用惯导辅助地磁进行导 航定位。前者是以惯导指示轨迹作为参考轨迹,并基 于航迹地磁序列与地磁基准图中的地磁序列进行相 关性分析,但存在航向误差时,定位结果有较大偏差。 而后者是源于图像匹配的迭代最近点算法,其基本思 想是认为惯导指示轨迹和真实轨迹存在相似性,通过 不断平移和旋转的刚性变换,即可找到测量值与背景 场数据的最优匹配^[5-6]。然而,它对传感器误差敏感, 且在地磁异常场中容易出现误匹配现象。在定位精 度方面,ICCP 算法相较于 MAGCOM 算法考虑了除 平移外的旋转等匹配方式,精度更高[4]。但在计算复 杂度方面,这两类算法都存在搜索区域过大和收敛速 度较慢的问题。

针对以上算法的不足,已有学者采用各种方法 进行改进,但对于水下定位来说,效果仍不够显著。 文献[7]在 MAGCOM 基本思想的基础上提出了一 种基于迭代计算的 MAGCOM 算法,有效降低了算 法复杂度,但对于水下大尺度空间的定位来说,该 算法的定位精度仍有待提高。文献[8]分析了 ICCP 误匹配的原因,并提出了适用于地磁梯度匹配导航 的迭代搜索最近等值点(iterative search for closest contour points, ISCCP)算法,有效解决了在地磁平 缓区的误匹配问题。但由于该方法要求使用相互

垂直的等值线,否则需对所有地磁梯度等值线进行 ISCCP运算,这在地磁梯度变化较快的区域中会导 致计算量大大增加,从而丧失算法优势。文献[9] 提出了 ICCP 算法的一种椭圆搜索区域,并利用遗 传算法实现快速收敛,但适应度函数的设计没有兼 顾惯导指示轨迹,这将导致航向匹配混乱。文献 [10-11]将概率数据关联(probability data association, PDA)与 ICCP 算法结合,以降低误匹配的概 率,但这导致搜索次数过大,算法复杂度进一步提 高。针对算法复杂度的问题,遗传算法作为一种应 用广泛的群体式元启发算法,由J.H. Holland 在 1975年提出,其灵感来自生物进化过程,算法的基 本元素是染色体、适应度选择和生物启发算子[12]。 遗传算法在全局搜索方面具有较大优势,可以避免 在优化过程中陷入局部最优。但传统的遗传算法 不适合直接用于地磁匹配,需要对其初始化种群、 搜索过程及适应度函数等方面进行改进。

传统算法存在的定位精度低、计算复杂度高的 问题,主要源于算法本身的局限性。这些算法没有 充分利用惯导指示轨迹信息或只依靠地磁数据信 息,导致匹配过程中存在难以预知的误差;同时,没 有预先缩小匹配区域或过度搜索非网格点数据,导 致算法复杂度过高。因此,本文提出了一种新型的 水下地磁/声学/惯性融合导航算法。首先,通过定 期的声学测距信息进行刚性变换得到粗匹配轨迹, 避免使用迭代的 ICCP 算法,同时能够预先缩小匹 配区域;其次,在粗匹配的基础上,利用改进遗传算 法和禁忌搜索算法,在适应度函数中加入有关声学 测距和惯导信息的惩罚项,对轨迹进行重构和更 新,并通过卡尔曼滤波进行融合和修正,避免航向 匹配混乱。该算法能够进一步提升定位精度并减 少定位耗时。

1 地磁/声学/惯性融合导航算法整体框架

地磁/声学/惯性融合导航算法的框架设计充 分考虑了地磁数据、声学测距信息及惯导指示轨迹 的优势。地磁数据搭配惯导指示轨迹是传统算法 中常见的一种组合策略,其中,惯导指示轨迹充当 原材料,在地磁数据的指引下,通过不断变换、加 工,逐渐接近真实轨迹。新型的地磁/声学/惯性融 合导航算法在上述基础上引入了声学测距信息,充 分利用声学测距的优势,通过粗匹配与精匹配两个 阶段的融合处理,进一步提高定位精度。算法整体 框架如图1所示。





在粗匹配阶段,通过刚性变换将声学测距信息 和惯导信息进行融合,得到粗匹配轨迹;在精匹配 阶段,通过改进遗传算法将粗匹配轨迹和地磁数据 信息进行初步融合,再通过卡尔曼滤波与惯导信息 进行二次融合,最后得到精匹配轨迹。具体实现过 程将在第2章详细展开。

2 地磁/声学/惯性融合定位算法实现

2.1 粗匹配阶段

假设预先在海底布设用于声学测距的锚节点 (anchor node),在航行的声纳覆盖范围内只需一个锚 节点。该锚节点的作用是定期发出定位脉冲信号,以 提供该定点与水下航行器之间的距离信息。如果水 下航行器不在声纳覆盖范围内,则不进行粗匹配。水 下航行器搭载惯导系统(inertial navigation system, INS),惯导实时提供目标的姿态信息。尽管由单个锚 节点的测距信息无法得到确切的位置信息,但能结合 惯导指示轨迹进行刚性变换,从而达到粗匹配和预先 缩小匹配区域的目的。如图 2 所示,该刚性变换分为 2 个步骤。

Step1:平移。设在一段待匹配的轨迹中,惯导估计的第*i*个采样点的地理位置*X*^{INS}和锚节点的地理位置*X*^A可分别表示为

$$\boldsymbol{X}_{i}^{\text{INS}} = [\boldsymbol{\lambda}_{i}, \boldsymbol{L}_{i}]^{\text{T}}$$
$$\boldsymbol{X}^{\text{A}} = [\boldsymbol{\lambda}_{\text{A}}, \boldsymbol{L}_{\text{A}}]^{\text{T}}$$
(1)





其中: λ 表示经度; L 表示纬度。轨迹中第一个结合 测距的采样点坐标记为 X^{INS},通过式(2)表征的相 似比变换将其平移至测距所在的圆弧上,随后在第 一个变换点的基础上由式(3)更新其他采样点。此 过程相当于对惯导轨迹进行整体平移。

$$\boldsymbol{X}_{1}^{S} = \frac{R}{\|\boldsymbol{X}_{1}^{INS} - \boldsymbol{X}^{A}\|} (\boldsymbol{X}_{1}^{INS} - \boldsymbol{X}^{A}) + \boldsymbol{X}^{A} \qquad (2)$$

$$\boldsymbol{X}_{i}^{\mathrm{S}} = \boldsymbol{X}_{i}^{\mathrm{INS}} - \boldsymbol{X}_{1}^{\mathrm{INS}} + \boldsymbol{X}_{1}^{\mathrm{S}}$$
(3)

其中: R 表示声学测距结果; X_i^s 表示经过平移变换 后的轨迹中的第i 个采样点,式(3) 中 2 $\leq i \leq n$ 且 $i \in Z$, n 为轨迹中的采样点个数。

Step2:旋转。经平移后的轨迹可能出现不在真 实轨迹同一侧区域的情况,同时,惯导累积的航向 误差也可能导致平移后的轨迹并非处于最佳的匹 配区域。因此,有必要通过式(4)进行整体旋转调 整,为接下来的精匹配作准备。

$$\begin{cases} \boldsymbol{X}_{i}^{\mathrm{R}} = \begin{bmatrix} \cos\theta & -\sin\theta \\ \sin\theta & \cos\theta \end{bmatrix} (\boldsymbol{X}_{i}^{\mathrm{S}} - \boldsymbol{X}^{\mathrm{A}}) + \boldsymbol{X}^{\mathrm{A}} \\ \theta = \operatorname{argmin}_{\theta} \sum_{i=1}^{n} (B_{i} - \dot{B}_{i})^{2} \end{cases}$$
(4)

其中: X_i^R 表示经过旋转变换后的第 *i* 个采样点坐标, 1 $\leq i \leq n \perp i \in Z; \theta$ 是最优旋转角。经此旋转角变换 后的轨迹的地磁数据估计值 B_i 与测量的地磁数据 B_i 最为接近,其中 B_i 由临近地磁基准图网格点数据通过 反距离加权平均得到,具体形式由文献[13]给出。

经过平移和旋转后,得到了不改变惯导指示轨 迹形状的估计轨迹,即粗匹配轨迹。由于地磁测量 存在未知噪声、惯导具有累积航向误差和累积尺寸 误差,这些误差无法通过简单的刚性变换消除,需 要进一步对每个采样点的位置进行调整,由此引入 了改进遗传算法和禁忌搜索算法进行优化求解。

2.2 精匹配阶段

2.2.1 改进遗传算法

在改进的遗传算法中,基因定义为轨迹中每个采 样点的坐标,染色体定义为完整采样点构成的有序轨 迹。每个染色体及其在地磁基准图对应网格点上的 地磁数据构成一个个体,一个种群则包含了多个不同 性状的个体,即各种匹配的轨迹,如图 3 所示。以粗 匹配的轨迹为基础,不同于其他常见的地磁匹配遗传 算法,改进后的遗传算法将在每个点为中心的正方形 区域内随机生成位于地磁基准图网格点上的坐标,而 非对整体轨迹进行操作。这是为了对每个坐标点进 行更为细致的调整。同时,由于直接生成位于网格点 上的坐标,可以快速查询地磁数据,不需要再进行插 值,从理论上降低了算法复杂度。



Fig. 3 Structure of initialized population

由于初始化时每个采样点是随机生成且相互 独立的,初始化后的轨迹可能与原轨迹差异过大, 具体表现为航向混乱以及轨迹反折。与传统的遗 传算法不同,改进后的算法在每代种群计算适应度 前,会进行一个轨迹重构的处理以降低轨迹的混乱 程度,如图4所示。该过程可表示为

$$\sigma = \begin{pmatrix} d(\mathbf{X}_{1}^{R}) & d(\mathbf{X}_{2}^{R}) & d(\mathbf{X}_{3}^{R}) & \cdots & d(\mathbf{X}_{n}^{R}) \\ r_{1} & r_{2} & r_{3} & \cdots & r_{n} \end{pmatrix}$$
(5)
$$\sigma^{1} = \begin{pmatrix} d(\mathbf{X}_{1}^{I}) & d(\mathbf{X}_{2}^{I}) & d(\mathbf{X}_{3}^{I}) & \cdots & d(\mathbf{X}_{n}^{I}) \\ r_{1}^{I} & r_{2}^{I} & r_{3}^{I} & \cdots & r_{n}^{I} \end{pmatrix}$$
(6)

$$\sigma^{\text{new}} = \sigma \cdot (\sigma^{1})^{-1} \tag{7}$$

$$\mathbf{X}^{\mathrm{I}} = \langle d^{-1}(\sigma_{2}^{\mathrm{new}}) \rangle \tag{8}$$

其中: σ 和 σ^{1} 分别表示粗匹配轨迹的置换和初始化 轨迹的置换; $d(\cdot)$ 为欧几里得距离函数,表示该点 到对应轨迹中第一个采样点的距离; r_i 和 r_i^{1} 分别表 示 σ 和 σ^{1} 第一行的第i个元素在第一行中从小到大 排列后对应的排序索引。式(6)中的 X_i^{1} 表示初始 化后轨迹第i个采样点坐标。式(7)表示将置换 σ 和 σ^{1} 的逆置换相乘得到含有重构轨迹距离信息的 新置换 σ^{new} , σ^{new} 表示 σ^{new} 的第二行,实际上是 σ^{1} 第 一行的重排列, $d^{-1}(\cdot)$ 表示取欧几里得距离函数的 反变换得到对应的坐标。式(8)表示重构后的各坐 标组成一个有序排列,即重构轨迹, X^{1} 表示重构后 的轨迹采样点坐标。



对于常见的水下导航情景来说,航行轨迹不会 频繁往返,各采样点距离初始点的位置整体会有较 长时间的单调增加或单调减小情况,可确保轨迹重 构的有效性。重构后的轨迹不改变任何坐标点的 位置,只是调整了其在轨迹中的先后顺序。通过这 种调整可以消除轨迹中的反折现象,并降低航向混 乱程度,以便生成更有潜在价值的匹配轨迹。

为了使优化后的轨迹向真实轨迹不断演化,设计 了更适合于地磁匹配的适应度函数以评估每个个体。 基本思路是以地磁基准图网格点上的数据为基础,评 估每个个体地磁值序列与测量的地磁值序列的误差, 目标是使适应度函数最小。同时,当轨迹的航向与惯 导指示轨迹相比存在过大偏差时会增加航向惩罚项, 而当第一个采样点偏离测距圆弧过大时会增加测距 惩罚项。具体适应度函数 f 可表示为

$$f = \sum_{i=1}^{n} |B_{i} - \hat{B}_{i}| + \frac{\sum_{i=1}^{n-1} (\theta_{i} - \hat{\theta}_{i})^{2}}{n-1} \cdot u \left(\frac{\sum_{i=1}^{n-1} |\theta_{i} - \hat{\theta}_{i}|}{n-1} - \alpha \right) \cdot u \left(\max |\theta_{i} - \hat{\theta}_{i}| - \beta \right) + \sqrt{\frac{|\rho - R|}{R}} \cdot u \left(\frac{|\rho - R|}{R} - \kappa \right)$$
(9)

其中: *u*(•) 表示阶跃函数,当变量值大于 0 时其值 为 1,否则为 0;*θ* 为相邻采样点之间的航向角;*α* 为 最大允许的平均航向偏差;*β* 为最大允许的单次航 向偏差;*ρ* 为第一个采样点与锚节点之间的距离;*κ* 为最大允许偏离距离百分比。如果水下航行器不 在声纳覆盖范围内或声学测距信息不可用,则令测 距惩罚项为 0,此时相当于使用地磁和惯性进行融 合导航。需要注意的是,这里的地磁数据以及地磁 基准图数据经过了归一化处理。计算每个个体的 适应度函数值,当超过允许的参数值时,惩罚项将 会增加适应度函数的值,以此来对种群进化方向进 行约束和引导。

在计算适应度函数后,将根据传统的精英策略 选择个体进入交叉环节,即保留适应度函数值最小 的 m 个个体^[14]。在交叉环节,选用两点交叉法,随 机选择父本和母本,并根据其染色体上随机 2 个交 叉点之间的片段进行交换,产生具有不同轨迹的个 体。在变异环节,选用随机步长变异法,使种群中 每个个体的随机基因部位发生突变,对应坐标随机 增加或减少 [x] 个单位的网格点距离,[x] 表示不 超过 x 的最大整数。

为进一步提升算法的局部搜索能力,降低匹配 误差,在每代种群变异后加入禁忌搜索。禁忌搜索 算法是一种常见的局部搜索算法,它基于邻域搜索 方法和自适应记忆,将每轮搜索到的高质量解决方 案存储在禁忌表中并定期解禁,以防止算法陷入循 环^[15]。首先,对所有个体的同一个随机基因部位在 其各自的邻域内进行搜索,找到其中网格点对应地 磁值与最为接近测量值的坐标进行替换。然后,将 此基因部位列入禁忌表中,每隔q代进行解禁,在解 禁前该基因部位不会被重复选择进入禁忌搜索环 节。该过程可表示为

$$\begin{cases}
\Omega_{\lambda} = [\lambda_{i}^{1} - a, \lambda_{i}^{1} + a] \\
\Omega_{L} = [L_{i}^{1} - a, L_{i}^{1} + a] \\
\Omega = (\Omega_{\lambda} \times \Omega_{L}) \cap M
\end{cases}$$
(10)

s.t.
$$i \notin T$$

$$\boldsymbol{X}_{i}^{1} \rightarrow \boldsymbol{X}_{i}^{G}, \boldsymbol{X}_{i}^{G} = \underset{\boldsymbol{X}_{i} \in a}{\operatorname{argmin}} \left| B(\boldsymbol{X}_{i}) - B_{i} \right| \quad (11)$$

$$T \to T \bigcup \{i\} \tag{12}$$

$$T \to T - \{j_q\} \tag{13}$$

其中:式(10)表示选取不在禁忌表 T 中的基因部

位,找出其邻域内的所有网格点组成搜索区域 Ω ,*a* 表示搜索区域的边长, Ω_{λ} 代表经度搜索范围, Ω_{L} 代 表纬度搜索范围,*M* 代表地磁基准图所有网格点的 集合;式(11)表示将当前基因部位的坐标 X_{i}^{1} 替换 为网格点上最为接近地磁测量值的坐标 X_{i}^{2} , $\tilde{B}(X_{i})$ 表示地磁基准图中网格点坐标 X_{i} 对应的地磁数据; 式(12)将当前基因部位加入禁忌表中;式(13)表示 将已被禁用q代的基因部位 j_{q} 从禁忌表中解禁。由 于该环节是对所有个体的同一基因部位进行处理, 可以整体更新局部最优解,同时不会陷入演化停 滞。禁忌搜索在改进遗传算法中承担局部精确搜 索的任务,进一步提升算法的优化效果。

2.2.2 卡尔曼滤波

卡尔曼滤波器是具有高斯噪声的线性系统最 小方差意义上的最优递归状态估计器,已被广泛应 用于定位、导航、目标跟踪和信号处理等领域^[16]。 由于改进遗传算法得到的轨迹仍可能存在个别严 重偏离实际航向的坐标,可利用卡尔曼滤波对改进 遗传算法得到的轨迹进行融合,以修正过度偏离 点。考虑将系统方程中的经纬度坐标和经纬度方 向上的速度作为状态量,改进遗传算法得到的轨迹 中的经纬度坐标作为滤波器的观测量,则状态方程 和观测方程分别为

$$\boldsymbol{Y}_{k} = \boldsymbol{\Phi} \boldsymbol{Y}_{k-1} + \boldsymbol{\omega}_{k-1} \tag{14}$$

$$\boldsymbol{X}_{k}^{\mathrm{G}} = \boldsymbol{H}\boldsymbol{Y}_{k-1} + \boldsymbol{n}_{k-1} \tag{15}$$

其中: $Y_k = [\lambda_k, L_k, v_k^\lambda, v_k^\lambda]^T, \lambda_k 和 L_k 分别表示第 k 个$ $采样点的经度和纬度, <math>v_k^\lambda$ 和 v_k^λ 分别表示第 k 个采样点 在经度方向上和纬度方向上的速度; X_k^G 表示改进遗传 算法得到的轨迹的第 k 个采样点坐标; **0** 和 H 分别为

状态转移矩阵和观测矩阵,
$$\boldsymbol{\Phi} = egin{bmatrix} 1 & 0 & t & 0 \\ 0 & 1 & 0 & t \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$
, $\boldsymbol{H} =$

 $\begin{bmatrix} 1 & 0 & t & 0 \\ 0 & 1 & 0 & t \end{bmatrix}$, t 为采样间隔时间; ω_k 为系统噪声,其协方差矩阵记为 $Q;n_k$ 为观测噪声,其协方差矩阵记为 V,可取对应数据的噪声方差计算得到。

首先,根据不含噪声的状态方程进行先验估计 得到 \hat{Y}_{k}^{-} ,然后由式(16) ~ 式(19)依次计算先验误 差协方差 P_{k}^{-} 、卡尔曼增益 K_{k} 、后验估计一阶差分 \hat{Y}_{k} 和后验误差协方差 P_k ,以此对每个采样点进行更新,得到最终匹配轨迹的第 k 个采样点坐标,即 \hat{Y}_k 的第一行和第二行。

$$\boldsymbol{P}_{k}^{-} = \boldsymbol{\Phi} \boldsymbol{P}_{k-1}^{-} \boldsymbol{\Phi}^{\mathrm{T}} + \boldsymbol{Q}$$
(16)

$$\mathbf{K}_{k} = \mathbf{P}_{k}^{-} \mathbf{H}^{\mathrm{T}} [\mathbf{H} \mathbf{P}_{k}^{-} \mathbf{H}^{\mathrm{T}} + \mathbf{V}]^{-1}$$
(17)

$$\hat{\boldsymbol{Y}}_{k} = \hat{\boldsymbol{Y}}_{k}^{-} + \boldsymbol{K}_{k} (\boldsymbol{X}_{k}^{\mathrm{G}} - \boldsymbol{H}\hat{\boldsymbol{Y}}_{k}^{-})$$
(18)

$$\boldsymbol{P}_{k} = (\boldsymbol{I} - \boldsymbol{K}_{k} \boldsymbol{H}) \boldsymbol{P}_{k}^{-}$$
(19)

2.3 算法步骤

综上所述,地磁/声学/惯性融合导航算法的流 程和伪代码分别如图 5 和表 1 所示。

算法整体分为粗匹配和精匹配 2 个阶段。在粗匹配阶段,主要参与融合导航的是声学测距和惯性信息,对轨迹整体进行刚性变换,可以迅速缩小地磁匹配区域,避免使用复杂度较高的 ICCP 算法;在精匹配阶段,主要参与融合导航的是地磁数据和惯性信息,通过改进遗传算法和卡尔曼滤波,对轨迹每个采样点进行更为细致的匹配,可进一步提高定位精度。







表1 地磁/声学/惯性融合导航算法伪代码

Tab. 1 Pseudo code for geomagnetic/acoustic/inertial

fusion navigation algorithm

算法:地磁/声学/惯性融合导航算法			
输入:地磁/声学/惯性信息			
输出:精匹配轨迹			
1 // 粗匹配阶段			
2 刚性变换平衡,根据式(1)~式(3);			
3 刚性变换旋转,根据式(4);			
4 // 精匹配阶段			
5 初始化种群;			
6 for <i>i</i> =1:迭代次数 do			
7 轨迹重构,根据式(5)~式(8);			
8 计算个体适应度,根据式(9);			
9 选择、交叉、变异;			
10 禁忌搜索,根据式(10)~式(13);			
11 end			
12 卡尔曼滤波,根据式(14)~式(19)			

3 仿真分析

3.1 仿真环境设置

仿真所用地磁基准图来源为国际地磁参考场 (international geomagnetic reference field, IGRF) 的最新版本 IGRF13。选取 2024 年 7 月印度洋某 区域内的地磁总场强度、地磁北向强度、地磁东向 强度及地磁垂直方向强度,经过插值得到网格间距 为 0.000 1°的地磁数据,加入随机局部地磁异常场, 并通过主成分分析和归一化得到最终用于仿真的 地磁基准图。

预先在海底部署并校准一个锚节点,通过搭载 全球定位系统(global positioning system, GPS)和 超短基线定位系统的水面船舶对节点进行多次定 位,其定位精度可达斜距的 0.2%,因此可认为锚节 点的定位精度相当准确^[17]。水下航行器搭载 INS, 可获取每个采样点的地理位置信息;同时,配备压 力传感器和声学测距仪,可获取自身的深度信息和 与锚节点之间距离信息。其他有关水下航行器和 INS 的参数如表 2 所示,有关改进遗传算法的参数 设置如表 3 所示。

3.2 仿真结果分析

为验证所提出的算法在定位精度和计算速度 方面的优势,将本文算法与本文算法(不含声学)、 文献[2]中的遗传算法、文献[5]中的 ICCP 算法、结 合声学测距的遗传算法及结合声学测距的ICCP算

表 2 水下航行器和 INS 的参数

Tab. 2	Parameters	of	underwater	vehicles	and INS	

变量	参数
初始位置经度	65.03°
初始位置纬度	10.04°
航行速度	10 m/s
航向角	37°
采样点间隔	1 s
采样点总数	500
惯导初始经向误差	1 000 m
惯导初始纬向误差	1 000 m
陀螺仪常值漂移	0.02(°)/h
陀螺仪随机漂移	0.005(°)/ \sqrt{h}
加速度计常值漂移	$10 \ \mu g$
加速度计随机漂移	$1 \ \mu g / \sqrt{\text{Hz}}$

表 3 改进遗传算法的参数

Tab. 3 Parame	ters of	improved	genetic a	lgorithm
---------------	---------	----------	-----------	----------

变量	参数
每代种群个体数	50
迭代次数	500
最大允许的平均航向偏差	30°
最大允许的单次航向偏差	45°
最大允许偏离距离百分比	16 %
每代中选择用于交叉的个体数	8
变异概率	0.3
正方形搜索边长	20×网格间距
禁忌搜索解禁周期	10代/次

法进行了对比,匹配轨迹图和定位误差结果分别如 图 6 和图 7 所示,其平均定位误差及算法运行时间 的统计结果如表 4 所示。

由图 6 和图 7 的结果对比可以看出,所提出的 算法在定位精确度方面明显优于其他算法,相较于 遗传算法和 ICCP 算法平均定位误差分别降低了 63.47%和46.90%。这得益于声学测距信息的辅 助、粗匹配和精匹配的结合及卡尔曼滤波融合 3 个 方面相互配合,在匹配精度方面具有更大的优势。 同时,本文算法在计算速度方面也有较好的表现, 与文献[2]的遗传算法运行时间较为接近,相较于 ICCP 算法减少了 55.00%。采用改进遗传算法进 行优化比使用不断迭代的 ICCP 具有快速搜索的优 势。还可以看出,与不采用声学测距信息的本文算 法相比,加入声学测距信息的本文算法平均定位误 差降低了 52.00%,算法运行时间减少了 21.85%, 可见声学测距信息辅助可以有效提高定位精度,并 降低前期大面积查找计算资源的消耗。



Fig. 6 Matching trajectories under six algorithms



Fig. 7 Positioning errors under six algorithms

表 4 平均定位误差统计结果和算法运行时间统计结果

Tab. 4 Statistical results of average positioning error

and algorithm running time

算法	平均定位误差/m	算法运行时间/s
本文算法	82.344	2.014
本文算法(不含声学)	171.565	2.577
遗传算法[2]	225.429	2.061
ICCP 算法 ^[5]	155.094	4.476
声学+遗传算法[2]	205.878	2.143
声学+ICCP 算法 ^[5]	125.217	3.982

此外,相较于不使用声学测距信息的遗传算法 和 ICCP 算法,加入声学测距信息进行一个粗匹配 阶段后,平均定位误差可分别降低 8.67% 和 19.26%,表明声学测距粗匹配对于定位精度的提 升起到了积极作用。在计算速度方面,遗传算法增 加粗匹配阶段后算法运行时间几乎不变,表明粗匹 配阶段的实际复杂度并不高;而 ICCP 算法增加粗 匹配阶段后算法运行时间减少了 11.04%,表明声 学测距的辅助降低了 ICCP 前期大面积查找计算资 源的消耗,减少了 ICCP 的迭代次数。然而,加入声 学测距粗匹配阶段后,传统算法表现仍劣于本文提 出的算法,主要原因是传统算法本身缺乏对声学测 距信息的融合处理,仅增加一个粗匹配过程所带来 的定位精度和计算速度提升是有限的。

4 结论

针对传统地磁匹配算法在水下定位中精度不 足、计算速度较慢的问题,提出了一种新型的水下 地磁/声学/惯性融合导航算法,结论如下:

1)采用声学测距信息辅助可以提高定位精度, 并降低前期地磁匹配大面积查找计算资源的消耗, 从而提升算法效率。

2)改进遗传算法充分融合了声学测距信息、惯导指示轨迹和地磁数据,相较于传统遗传算法和 ICCP 算法有明显优势,平均定位误差分别降低了 63.47%和46.90%,匹配速度相较于 ICCP 算法减 少了 55.00%,与计算实时性较好的遗传算法接近, 从而验证了其具有良好的定位性能。

参考文献

- 【1】林沂,孙晶京,闫旭.地磁导航定位技术原理与方法 综述[J].全球定位系统,2023,48(6):32-41.
 LIN Yi, SUN Jingjing, YAN Xu. A review of the principles and methods of geomagnetic navigation and positioning technology[J]. GNSS World of China, 2023,48(6):32-41(in Chinese).
- [2] 朱占龙,杨功流,王艳永,等.一种基于自适应遗传 搜索策略的地磁匹配算法研究[J].测控技术,2014, 33(6):146-149.
 ZHU Zhanlong, YANG Gongliu, WANG Yanyong,

et al. Research on a geomagnetic matching algorithm based on an adaptive genetic search strategy [J]. Measurement and Control Technology, 2014, 33(6): 146-149(in Chinese).

- [3] 蔡兆云,魏海平,任治新.水下地磁导航技术研究综述[J].国防科技,2007(3):28-29.
 CAI Zhaoyun, WEI Haiping, REN Zhixin. A review of underwater geomagnetic navigation technology[J].
 National Defense Technology, 2007(3): 28-29(in Chinese).
- [4] 陆一,魏东岩,纪新春,等.地磁定位方法综述[J]. 导航定位与授时,2022,9(2):118-130.
 LU Yi, WEI Dongyan, JI Xinchun, et al. A review of geomagnetic positioning methods[J]. Navigation Positioning and Timing, 2022,9(2):118-130(in Chinese).
- [5] 康崇,张晓峻,樊黎明.基于 ICCP 算法的地磁匹配

辅助导航[J]. 应用基础与工程科学学报,2014,22 (3):598-605.

KANG Chong, ZHANG Xiaojun, FAN Liming. Geomagnetic matching assisted navigation based on the ICCP algorithm[J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2014, 22(3): 598-605(in Chinese).

- [6] 邓翠婷,黄朝艳,赵华,等.地磁匹配导航算法综述
 [J].科学技术与工程,2012,12(24):6125-6131.
 DENG Cuiting, HUANG Chaoyan, ZHAO Hua, et al. A review of geomagnetic matching navigation algorithms[J]. Science Technology and Engineering, 2012, 12(24): 6125-6131(in Chinese).
- [7] 解伟男,李清华,奚伯齐,等.基于迭代计算的地磁 轮廓线匹配算法[J].中国惯性技术学报,2015,23 (5):631-635.

XIE Weinan, LI Qinghua, XI Boqi, et al. A geomagnetic profile matching algorithm based on iterative computation[J]. Journal of Chinese Inertial Technology, 2015, 23(5): 631-635(in Chinese).

[8] 金子翔,许苏鹏,张贵宾,等.一种适用于地磁梯度
 匹配导航 ISCCP 算法[J].物探与化探,2022,46
 (5):1225-1231.

JIN Zixiang, XU Supeng, ZHANG Guibin, et al. An ISCCP algorithm for geomagnetic gradient matching navigation[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2022, 46(5): 1225-1231(in Chinese).

- [9] REN Y, WANG L, LIN K, et al. Improved iterative closest contour point matching navigation algorithm based on geomagnetic vector[J]. Electronics, 2022, 11(5): 796.
- [10] XIAO J, DUAN X, QI X, et al. An improved ICCP matching algorithm for use in an interference environment during geomagnetic navigation [J]. Journal of Navigation, 2020, 73(1): 56-74.
- [11] DUAN X, XIAO J, QI X, et al. An INS/geomagnetic integrated navigation algorithm based on matching strategy and hierarchical filtering[J]. Electronics, 2019, 8(4): 460.
- [12] KATOCH S, CHAUHAN S S, KUMAR V. A review on genetic algorithm: past, present, and future[J]. Multimedia Tools and Applications, 2021, 80: 8091-8126.
- [13] SETIANTO A, TRIANDINI T. Comparison of Kriging and inverse distance weighted (IDW) interpolation methods in lineament extraction and analysis[J]. Journal of Applied Geology, 2013, 5(1): 7204.
- [14] SOON G K, GUAN T T, ON C K, et al. A comparison on the performance of crossover techniques in

video game[C]// Proceedings of 2013 IEEE International Conference on Control System, Computing and Engineering. Penang: IEEE, 2013: 493-498.

- [15] KLUABWANG J, PUANGDOWNREONG D, SU-JITJORN S, et al. Multipath adaptive tabu search for a vehicle control problem [J]. Journal of Applied Mathematics, 2012(1): 731623.
- [16] HUANG Y, ZHANG Y, ZHAO Y, et al. A novel outlier-robust Kalman filtering framework based on statistical similarity measure[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2020, 66(6): 2677-2692.
- [17] ZHAO W, ZHAO S, LIU G, et al. Range-only single beacon based multisensor fusion positioning for AUV[J].
 IEEE Sensors Journal, 2023, 23(19): 23399-23409.

(编辑:孟彬)