

一种改进型 TERCOM 水下地磁匹配导航算法

赵建虎¹ 王胜平^{1,2} 王爱学¹

(1 武汉大学测绘学院,武汉市珞喻路 129 号,430079)
(2 武汉大学卫星导航定位技术研究中心,武汉市珞喻路 129 号,430079)

摘 要:鉴于 INS 积累误差及 TERCOM 匹配算法机理缺陷对地磁匹配导航精度和可靠性的影响,提出了一种改进型的 TERCOM 匹配导航算法。分析了该算法的机理缺陷,将基于 Hausdorff 距离的匹配准则引入该算法中,提出了通过增加旋转变换、自适应确定最佳旋转角、实现适配序列精匹配思想和算法,有效地提高了水下地磁匹配导航的精度和可靠性。通过实验验证了这种改进算法的正确性。

关键词:TERCOM; Hausdorff 距离; 地磁匹配; 旋转角

中图法分类号:P228; P229.2

水下载体的导航问题一直是各国研究的重点,由于受深海水体环境的影响,其一直是导航定位中比较困难的领域。目前,水下载体定位主要依靠惯性导航系统 INS 和水下声学定位两种技术。受惯性陀螺技术的限制,INS 导航定位误差会随着时间的加速积累,因此,水下载体单纯使用该系统难以在长时间实现精确导航;而声学定位导航需要庞大的水下声学阵列,且在军事应用中易暴露。这些问题均严重影响着水下载体的安全性及导航定位的准确性。近年来,基于地形、重力等特征的匹配导航技术的发展方兴未艾,但海床地形需要借助主动声呐来获取,且易暴露。此外,一定区域范围内,若地形、重力变化特征不明显,也会严重影响重力水下匹配导航定位的精度。地磁变化特征较为明显,比较适合作为匹配导航的导航源。地磁匹配导航中,需要载体运行区域范围内的地磁场模型或背景图^[1,2]、实测地磁序列以及用于提供载体概略位置的 INS 系统。匹配算法是实施水下匹配导航的一个非常关键的部分。

1 TERCOM 算法及其缺陷

TERCOM(terrain contour matching)是匹配导航中常用的一种匹配算法,其原理是利用平行于 INS 提供航迹的一组序列作为最终匹配序

列^[3-5]。该算法首先在格网内改变第一个 INS 推算点的位置,寻找一组与 INS 推算航迹平行的新的序列;遍历第一个 INS 推算位置有效范围内的格网,得到多组与 INS 推算航迹平行的序列;将每一组序列各点格网对应的地磁值与磁力实测值进行匹配,寻找匹配最优的一组作为最终的匹配结果。

最优匹配组的判断采用相关分析算法,目前主要采用的相关算法有互相关 COR(cross correlation)算法、平均绝对差 MAD(mean absolute difference)以及均方差 MSD(mean square difference)算法。其中,COR 的稳定性和精度均最差,不适合作为匹配结果的决定性指标;MAD 和 MSD 两指标接近,均优于 COR 指标。但从两者的模型来分析,MSD 是 MAD 的平方,实际上是将 MAD 放大后的指标,可以认为 MSD 更能够反映匹配的精度。因此,在实际应用中,采用 MSD 指标。

TERCOM 技术是目前采用最广泛的匹配导航技术,但由于 INS 提供的航迹与实际航迹存在一定的角度偏差,而 TERCOM 算法采用 INS 提供的航迹进行平移匹配,因此必然导致在背景图中寻找真实航迹时精度与稳定性均比较差。而且目前采用的三种最优配准原则存在相同的机理,不能实现相互校准。

2 基于 Hausdorff 距离的匹配准则

Hausdorff 距离是一种极大、极小距离表示法,其主要作用是反映两个集合之间的匹配程度,已经被广泛应用于模式识别、模板匹配等图像匹配领域。为增加 TERCOM 匹配算法的稳定性和其他相关算法的可靠性,将 Hausdorff 距离引入 TERCOM 地磁匹配导航中。

Hausdorff 距离主要是针对两个有限闭合点集间距离度量的数学定义,代表两个集合的不匹配程度,距离越大,其匹配程度越差;距离越小,匹配程度越好。若两个有限点集分别为 $X(x_1, x_2, \cdots, x_n)$ 和 $Y(y_1, y_2, \cdots, y_n)$,则这两个点集之间的 Hausdorff 距离可以表示为:

$$H(X,Y) = \max(h(X,Y),h(Y,X)) \tag{1}$$

式中, $H(X,Y)$ 也可以称为 X 集合和 Y 集合间的双向 Hausdorff 距离; $h(X,Y)$ 、 $h(Y,X)$ 分别表示集合 X 到集合 Y 、集合 Y 到集合 X 的单向 Hausdorff 距离,

$$h(X,Y) = \max_{x \in X} \min_{y \in Y} \|x - y\|$$
$$h(Y,X) = \max_{y \in Y} \min_{x \in X} \|x - y\| \tag{2}$$

式中, $\|\cdot\|$ 表示距离范数,可以用多种距离范数表示,常用的为欧氏范数、和范数以及极大范数。

通过对原始航迹所测的地磁值加不同范围内的随机噪声实现了对二者匹配性能的分析。由表 1 可以看出,二者均能够达到较高的匹配导航精度,MSD 用时 1.1 s,而 Hausdorff 用时 1.8 s,略低于 MSD,但 Hausdorff 距离提供了一种新的目标函数用于 TERCOM 匹配导航,增加了误匹配的诊断指标,有利于误匹配的发现。

表 1 MSD 和 Hausdorff 准则匹配结果及时间比较

Tab.1 Comparison of MSD and Hausdorff

	噪声 0 /nT			噪声 5 /nT			噪声 10 /nT		
	dx/m	dy/m	T/s	dx/m	dy/m	T/s	dx/m	dy/m	T/s
MSD	5	52	1.1	28	77	1.1	78	77	1.1
Hausdorff 距离	5	52	1.8	28	77	1.8	78	77	1.8

3 基于自适应旋转变换的 TERCOM 算法

针对传统 TERCOM 算法不能精确得到匹配结果的局限,下面给出一种基于自适应旋转角探测机制的 TERCOM 适配序列精匹配算法。首先根据 INS 提供的航迹,确定整个匹配航迹的重心坐标 (x_g, y_g) :

$$\begin{cases} x_g = \frac{1}{W} \sum_{i=1}^N w_i x_i, y_g = \frac{1}{W} \sum_{i=1}^N w_i y_i \\ W = \sum_{i=1}^N w_i, w_i = 1/(T_{ST} - T_{ACQ}) \end{cases} \tag{3}$$

式中, (x_i, y_i) 为 INS 提供的航迹平面位置坐标; w_i 为其权值。

其次,以该匹配序列的重心位置为原点,对 INS

提供的航迹增加旋转角:

$$[x_p, y_p] = \mathbf{R}(a)[x - x_g, y - y_g] \tag{4}$$

式中, $[x_p, y_p]$ 为添加旋转偏角 a 之后的航迹坐标; \mathbf{R} 为由 a 组成的旋转矩阵。将旋转后的航迹 $[x_p, y_p]$ 作为初始匹配序列进行 TERCOM 匹配,最终实现定位。

如图 1 所示,基于自适应旋转角探测机制的 TERCOM 适配序列精匹配导航定位过程如下:①对于每个格网,初始匹配时,旋转角从 0° 开始以 s 为步长(s 设置为 0.5°)对原始 INS 航迹进行旋转,每旋转一次,利用旋转后的航迹进行一次传统 TERCOM 匹配,直到旋转角大于 2 倍 INS 角度积累误差(设置为 3°)。②根据 MSD 最优匹配准则,从每次匹配结果中得到最小的 MSD 及其对应的旋转角 a_i 。③以 a_i 为中心,在 $[a_i - s, a_i + s]$ 范围内以 $s/10$ 为步长重复②,进行循环迭

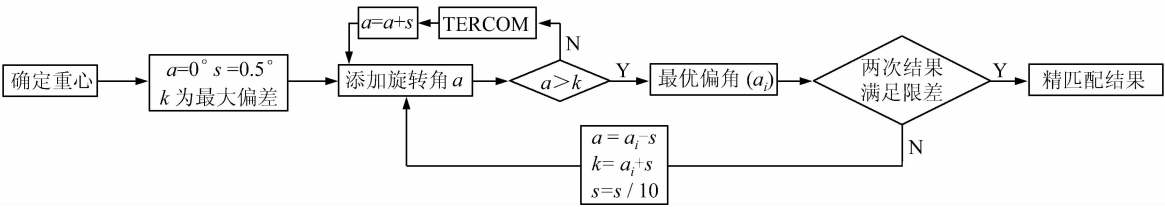


图 1 改进型精确 TERCOM 匹配导航算法流程

Fig.1 Flowchart of Improved TERCOM for Matching Positioning and Navigation

代。④当相邻两次匹配结果的差值满足限差时，停止迭代，计算实测磁力值与背景磁力值偏差的均方根。⑤遍历搜索区内的每一个网格。执行步骤①~⑤，得到一组实测磁力值与背景磁力值偏差的均方根序列，从该序列中找出精度最高的一组对应的格网，该格网的位置即为载体当前的位置。

从以上过程可以看出，旋转变换经历了一个由粗旋转到精旋转的过程，实现了 INS 提供航迹到真实航迹的精确校正，从而也实现了实测地磁序列与背景地磁序列的精确匹配以及载体位置信息的精确获取。

4 实验及分析

为检验上述算法相对传统 TERCOM 算法的优越性，2008 年 9 月，在中国渤海湾某海域进行了实际水下地磁测量实验。测区范围为 30 km×20 km，测量比例尺为 1：5 000。

对实验区的地磁观测数据进行处理，构建局地磁场模型，并以 50 m×50 m 格网化整个背景场。初始 INS 角度积累偏差设定为 3°，初始位置偏差在 x 和 y 方向均设为 2 000 m。采用改进的 TERCOM 算法和传统的 TERCOM 算法分别进行匹配导航定位实验。图 2 显示了匹配结果与真实航迹的偏差分布，图 3 显示了两种方法匹配定位后与真实航迹的吻合程度，表 2 给出了匹配后纠正航向与真实航向的偏差。

表 2 匹配后纠正航向与真实航向的偏差

Tab. 2 Difference Between Modified INS Track and Actual Track After Matching Processing

原始偏差	传统方法	改进
3°	3°	0.39°

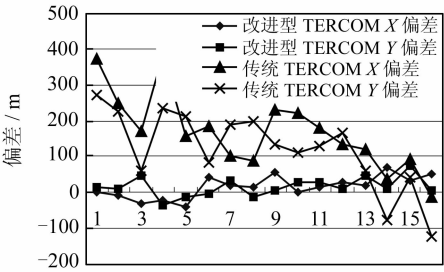


图 2 匹配结果误差分布图

Fig. 2 Error Distribution of Traditional and Improved TERCOM

由图 2、图 3 及表 2 可以看出，传统的 TERCOM 方法将初始位置偏差从 2 000 m 降低到

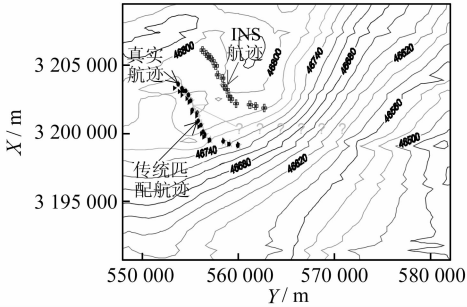


图 3 匹配结果比较示意图

Fig. 3 Matching Results of Traditional and Improved TERCOM

200~500 m，且因为在匹配过程中采用单纯的平移变换，误差分布呈线性变化，且匹配精度较差。改进型 TERCOM 匹配算法的匹配结果较好，平面位置精度达到了 100 m 以内，且误差分布均匀，符合随机误差分布的特点。

在 INS 角度误差校正方面，由于传统方法仅是对原始 INS 航迹进行平移，因此无法实现角度校正，角度误差积累仍然是 3°，而改进型 TERCOM 技术实现了角度积累修正，修复后的积累误差仅剩 0.39°。

5 结 语

本文研究并提出了一种适配序列精匹配算法，通过增加旋转变化、自适应确定最佳旋转角、实现适配序列精匹配的思想和算法。该方法可以实现平面位置在 100 m 以内的导航定位精度，角度校正精度也达到了 0.4°。

参 考 文 献

[1] Wang Shengping, Zhao Jianhua, Zhang Hongmei. Study on Key Technologies of Construction of Marine Geomagnetic Filed Model Based on Polynomial Method[C]. Ocean'08 MTS/IEEE, Quebec, Canada, 2008

[2] Zhao Jianhu, Liu Hui, Wang Shengping. Study on Building Local Marine Geomagnetic Field Model Based on Interpolation Method [C]. Ocean' 08 MTS/IEEE, Quebec, Canada, 2008

[3] 刘承香. 水下潜器的地形匹配辅助定位技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2003

[4] 刘准, 佘文芳, 陈哲. 海底地形匹配技术研究[J]. 系统仿真学, 2004, 116(4): 700-702

[5] 陈绍顺, 李彦斌, 李云. 地形匹配制导技术研究[J]. 制导与引信, 2003, 24(3): 17-21

绘及海底无源自主导航研究。

第一作者简介:赵建虎,教授,博士,博士生导师,主要从事海洋测

E-mail:jhzhao33@163.com

An Improved TERCOM Algorithm for Underwater Geomagnetic Matching Navigation

ZHAO Jianhu¹ WANG Shengping^{1,2} WANG Aixue¹

(1 School of Geodesy and Geomatics, Wuhan University, 129 Luoyu Road, Wuhan 430079, China)
(2 Research Center of GNSS, Wuhan University, 129 Luoyu Road, Wuhan 430079, China)

Abstract: Considering the influences of the accumulation errors of inertial navigation system (INS) and the principle shortcoming of traditional terrain contour matching (TERCOM) algorithm for underwater geomagnetic matching navigation, an improved TERCOM method is presented. A new matching criterion based on the Hausdorff distance is used in the system algorithm. The improved TERCOM algorithm is analyzed by increasing the rotation change, determining the optimum rotation angle automatically, and getting the precision matching result in appropriate matching area, which obviously improves the accuracy and credibility of underwater geomagnetic matching navigation compared with to traditional TERCOM algorithms. The new algorithm is verified by experiments.

Key words: TERCOM; Hausdorff distance; geomagnetic matching; rotation angle

About the first author: ZHAO Jianhu, professor, Ph. D., Ph. D supervisor, majors in ocean surveying and harbor passive autonomous navigation.

E-mail: jhzhao33@163.com

(上接第 1311 页)

Real Time Estimation of DCB Using Kalman Filters

GENG Changjiang¹ ZHANG Hongping^{1,2} ZHAI Chuanrun^{3,4}

(1 Research Center of GNSS, Wuhan University, 129 Luoyu Road, Wuhan 430079, China)
(2 State Key Laboratory of Information Engineering in Surveying, Mapping and Remote Sensing, Wuhan University, 129 Luoyu Road, Wuhan 430079, China)
(3 Shanghai Galileo Industries Ltd, 680 Guiping Road, Shanghai 200233, China)
(4 School of Aeronautics and Astronautics, Shanghai Jiaotong University, 800 Dongchuan Road, Shanghai 200240, China)

Abstract: Combined with VTEC Spherical Harmonic Function Model, the Kalman Filter with external constraint condition between some parameters solved is used for real time estimation of GPS satellite and receiver’s Differential Code Bias (DCB). This can be used to provide DCBs for Wide Area Augmentation System’s real time ionosphere delay modeling. The results show that the DCB can converge in short time in this solution. The final value of those DCBs is in little bias comparing with the results of IGS.

Key words: constrained; Kalman filter; differential code bias; VTEC

About the first author: GENG Changjiang, Ph. D candidate, majors in GNSS precise navigation position.

E-mail: gengchangjiang@126.com