

相关地磁匹配定位技术

刘 飞, 周贤高, 杨 晔, 李士心

(天津航海仪器研究所, 天津 300131)

摘要: 地磁匹配定位算法的本质是数字地图匹配, 相关匹配算法是数字地图匹配的有效算法。在地磁导航中该匹配算法自适应实时构造基准数据序列, 并以 Hausdorff 距离作为相关判断准则。为了提高算法实时性, 提出了预匹配和精匹配相结合的改进措施优化了运算过程。在预匹配过程中, 由于地磁数据的离散性, 搜索步长定为一个基本网格单元, 并与序贯相似检测原则相结合, 这样可快速排除非匹配区, 筛选得到精匹配所需要的可行区域。在精匹配中, 引入了双线性插值法对地磁场原始数据进行加密内插以提高匹配精度。最后利用地磁场数据进行了仿真试验, 结果表明在一定条件下该相关匹配算法对地磁导航具有适用性。

关键词: 地磁匹配; 数字地图; 序贯相似检测; Hausdorff 距离

中图分类号: U666.1

文献标识码: A

Geomagnetic matching location using correlative method

LIU Fei, ZHOU Xian-gao, YANG Ye, LI Shi-xin

(Tianjin Navigation Instruments Research Institute, Tianjin 300131, China)

Abstract: The geomagnetic matching technology was investigated, and a correlation matching algorithm was presented. The algorithm constitutes the referenced data sequence real-timely and adaptively, and adopts Hausdorff distance as correlative determining principle. The pre-matching and precise-matching were proposed to reduce the computing complexity and time. In pre-matching, the searching strategy defines a gridding unit as a step with SSDA method, so it can quickly eliminate non-matching area and gain feasible area for precise-matching. In addition, the dual-linear interpolation was introduced for further matching. Simulation experiment confirms that the correlation matching algorithm is applicable for geomagnetic navigation in certain condition.

Key words: geomagnetic matching; digital map; sequence similarity detection algorithm; Hausdorff distance

地磁场是地球的基本物理场, 地球周围空间的物体都处于地磁场中。利用磁传感器可以测量地磁场的各要素, 包括总磁场强度、东向分量、北向分量、垂直分量、磁偏角、磁倾角以及磁场梯度。地磁场具有全天时、全地域和短期稳定性等特征, 并且在不同方位具有不同的磁场要素, 故可将其作为导航场。地磁导航 (Geomagnetic Navigation) 就是利用地磁场的特征进行导航的新方法, 近年来得到了迅速发展。地磁导航同重力导航、地形导航一样, 是一种自主、隐蔽的导航技术。地磁导航的一个重要特点是当前估计状态与过去无关, 即误差不随时间积累。当把地磁导航与惯性导航组合并应用于水下潜艇时, 可校正惯导系统的时间积累误差, 提高惯导系统的精度, 对潜艇的军事应用具有重要意义。

1 地磁匹配的基本原理

地磁场空间的各异性是一种典型特征, 地磁匹配 (Geomagnetic Matching) 就是利用这种特征来确定载体的地理位置的, 地磁导航的工作原理如图1所示。

导航时, 首先把预先测量好的地磁信息存储在计算

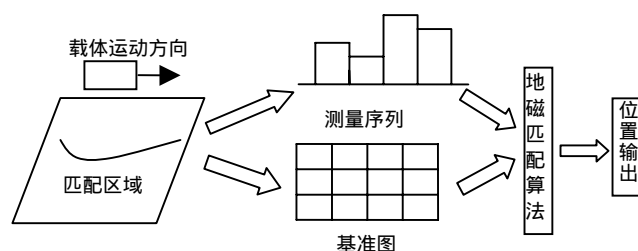


图 1 地磁导航原理示意图

Fig 1 Schematic diagram of geomagnetic navigation

收稿日期: 2006-09-26; **修回日期:** 2006-12-20

基金项目: “十一五”武器装备预研项目 (51309060301)

作者简介: 刘飞 (1961—), 男, 研究员, 主要从事导航、制导与控制及组合导航理论研究。E-mail: liufei@eyou.com

机上,构成数字地磁基准图。当载体运动到特定匹配区域时,由专用磁传感器测量所处位置的磁场特征,经载体运动一段时间后,测量得到一系列实时磁场特征值,简称测量序列。把测量序列与基准图进行相应的匹配,找出基准图中与测量序列最相匹配的位置序列,以此作为载体的位置估计信息。这就是地磁导航的基本原理。

为降低地磁导航的复杂程度和避免导航过程的多值解,可以与传统惯导系统组合。惯性/地磁组合导航系统精度受惯导系统精度、地磁数字地图精度、地磁传感器精度和匹配算法等的影响。匹配算法是地磁导航的核心技术,本文主要对地磁匹配算法进行研究。地磁匹配算法属于数字地图匹配技术,目前主要有两类:一类为断续的批相关处理技术,另一类为递推滤波技术。批处理技术算法原理简单,适用范围广,且无需对磁场作线性化假设,对初始误差要求低,应用于地磁匹配时具有较高的匹配精度和捕获概率^[8]。

2 相关地磁匹配算法分析

2.1 有关地磁数字地图

由于地磁场遍布近地空间,遍历测量存在实际困难,故基准地磁图的测量及存储主要采用网格形式。再根据地磁场在空间分布上的相关性,利用空间统计等数学处理方法得到网格间的磁场要素。空间统计学通过研究对象在空间上不同间隔的抽样点上的差异,定量描述其空间变化规律。空间内插法主要有多元回归法、Kriging 内插、Cokriging 内插、双线性内插等^[2]。格网精度直接影响地磁匹配精度。

2.2 测量数据的采集和基准数据的构造

载体在匹配区域运动时,磁传感器按一定的时间间隔采集一系列磁场强度值,经过数据预处理后得到测量数据带,记为: $H_N = [h_1, h_2, \dots, h_N]$, 其中, N 为一次匹配的采样个数,也称测量带长(或匹配长度),其值大小由地磁场的特点决定^[3]; h_N 为当前时刻的测量值,即需要匹配对准的时刻。当磁场信息丰富时, N 可适当取小些;当磁场信息贫乏时, N 应取大些。 N 的取值对匹配精度和匹配运算量有重要影响。为了防止匹配过程的几何失真误差,主要包括同步误差和比例因子误差^[7],我们可采用措施:1) 保证惯导输出数据与地磁测量数据同步采集;2) 基准数据带的实时构造。

基准数据带的构造方法如下:设惯导的输出位置序列为 $S_N = \{(x_i, y_i), i = 1, 2, \dots, N\}$; 记位置增量 $\Delta x_i = x_{i+1} - x_i$, $\Delta y_i = y_{i+1} - y_i (i = 1, 2, \dots, N-1)$ 。对任何一个搜索位置 $S_0 = (I_0, J_0)$, 便得到基准数据带的搜索位置序列:

$$I_i = I_{i-1} + \Delta x_i, J_i = J_{i-1} + \Delta y_i \quad (i = 1, 2, \dots, N-1)$$

利用基准位置序列: $\{(I_i, J_i), i = 0, 1, 2, \dots, N-1\}$ 在原始地磁基准图上进行重采样,便可以得到对应于搜索位置 S_0 的基准数据带,设为 $H'_N = [h'_1, h'_2, \dots, h'_N]$, 由此便产生了与测量数据相对应的基准数据,利于以后进行相关运算。

2.3 相关度量准则

度量测量序列和基准图中任一子图的相关性程度有多种算法,传统算法主要分两类:一类强调他们之间的相似程度,如互相关算法(COR)和相关系数法(CC);另一类强调他们之间的差别程度,如平均绝对差算法(MAD)和均方差算法(MSD)^[4,5]。在求最佳匹配点时,前一类算法应求极大值,后一类应取极小值^[8]。以下我们引入一种新的度量算法——Hausdorff 距离算法。Hausdorff 距离是一种极大极小距离,受物体平移、旋转、缩放等变换的影响较小。它的引入使地磁匹配基于一种新的测度,能更为有效地表征基准图和测量序列之间的相关性。

对于两个有限点集 $A = \{a_1, a_2, \dots, a_p\}$ 和 $B = \{b_1, b_2, \dots, b_q\}$, 则 A 、 B 之间的 Hausdorff 距离定义为:

$$d_H(A, B) = \max(d_h(A, B), d_h(B, A))$$

式中, $d_h(A, B) = \max \min \|a - b\| (a \in A, b \in B)$, $d_h(B, A) = \max \min \|b - a\| (a \in B, b \in A)$, $\|\cdot\|$ 是某种距离范数。Hausdorff 距离表征 A 与 B 之间的匹配程度。为使 A 与 B 相匹配,必须使其最小化。当地磁匹配中仅取磁场强度为特征量时,可简单定义距离测度为 $\|a - b\| = |a - b|$ 。Hausdorff 距离应用于地磁匹配时,测量序列与基准图的相关性定义为:

$$d_H(H_N, H'_N) = \min d_H(H_N, U), (H'_N \in U)$$

其中, U 为搜索匹配区。当在一定的搜索策略下使 Hausdorff 距离整体极小时,此时的 H'_N 对应的搜索点便是最佳匹配位置。后文用 $d_H(H_N, S)$ 表示以 S 为搜索起点得到的 Hausdorff 距离。

从以上可以看出, Hausdorff 距离用于地磁匹配时有以下特点:1) 与大多数传统相关匹配不同,它不强调匹配点对,点与点的关系是模糊的,如 A 中可以有一个以上的点与 B 中的同一点对应,因而 Hausdorff 距离具有很强的抗干扰能力和容错能力;2) Hausdorff 距离对于测量噪声,几何失真,变换误差都有一定的抑制作用;3) Hausdorff 距离的计算量为 $O(p, q)$,可进一步改进^[6]。

3 搜索策略优化

此批处理相关算法的特点是计算量大, 虽然通过改进可减少计算量, 但是这种算法的计算仍相当大, 特别是当匹配区域增大, 或匹配长度增加, 导航系统的实时性将难以保证。因此需要对此算法进行改进, 以下提出了改进方法。

3.1 预匹配

预匹配仅利用处理前的原始地磁数字方格图, 具体实现为:

1) 基准位置序列中的点处于格网中时磁场值的确定。按以上方法构造的基准序列可能处于网格当中, 此时该点无直接磁场基准值, 最简单的办法是用周围四点的均值代替, 如图 2 所示 a 点的磁场值为: $h'_a = (h'_1 + h'_2 + h'_3 + h'_4)/4$ 。

2) 搜索单元为一个方格, 步长为格网间隔。如图 2, 搜索位置的选择为地磁基准图插值前的方格, 每个方格用字母 A, B, C,表示。

3) 搜索单元 Hausdorff 距离的确定, 这里有两种方法:

a) 中心化法: 如图 2 所示, 对方格 A, 可以用处于 A 中心的点 a 的 Hausdorff 距离代替。

b) Hausdorff 距离均值法: 分别计算方格周围四点的 Hausdorff 距离, 再计算平均值, 即

$$d_H(H_N, A) = (d_H(H_N, A1) + d_H(H_N, A2) + d_H(H_N, A3) + d_H(H_N, A4))/4$$

4) 确定门限值 λ 。预匹配的目的在于缩小精匹配的搜索范围, 排除部分不相关的方格, 因此需规定恰当的门限值作为其判断标准。把集合 $U = \{u | d_H(H_N, u) < \lambda\}$ 作为精匹配的范围, λ 的值的确定与噪声强度和地磁特征有关, 可由实际经验得到。

5) 序贯相似检测 (SSDA)。在匹配过程中, 计算机会遍历搜索整个匹配区域, 有大量的计算都消耗在了非匹配点的计算上。为此, 我们可以采取一定措施预先排除非匹配点。这里暂用由 Barnea 和 Silverman 提出的序贯相似检测算法。其基本原理是: 如果待检测序列所有点被检测完之前该误差过早地达到了预定的阈值, 便以为该序列不是匹配点, 无需继续检测序列剩余的点, 而转向计算下一序列。

由 Hausdorff 算法可知, $d_H(H_N, H'_N) \geq d(H_N, h'_i), h'_i \in H'_N$, 其中 $d(H_N, h'_i) = \max \|h_N - h'_i\| (h_N, H_N)$ 。所以在计算 Hausdorff 距离的过程中, 若实时序列与基准序列中的某点的距离超过阈值 λ , 则直接排除该匹配域, 而不必计算完整的 Hausdorff 距离, 简化了运算。另外, 由 $d_H(H_N, A) \geq (d(H_N, A1) + d(H_N, A2) + d(H_N, A3) + d(H_N, A4))/4$ 可知, 直接用原地磁方格地图上的数据也可以排除一部分非可行匹配方格, 而不必构造自适应基准数据带, 提高了运算效率。

3.2 精匹配

精匹配过程: 利用空间插值等方法处理过的原始地图, 继续寻找最优匹配, 如图 3 所示。

若匹配区中的某些方格满足预匹配要求, 可将周围网格加密, 提高匹配精度。例如, 若 $A \in U$, 则对方格 A 作如下处理: 将 A 周围进行 3 分插值可以得到如图 3 所示的加密方格图, 加密网格点的磁场值通过插值方法得到。插值分点不宜选取太多, 一般 2~4 即可。插值方法可采用双线性插值:

$$H_Q = (1-u)(1-v)H_{A1} + u(1-v)H_{A2} + (1-u)vH_{A3} + uvH_{A4}$$

式中, (u, v) 是单元标准化坐标, $u = (x - x_{A1}) / (x_{A4} - x_{A1})$, $v = (y - y_{A1}) / (y_{A4} - y_{A1})$ 。把加密后的网格图继续按以上方法匹配, 可得出各新格的 Hausdorff 距离。当 H 游历完 U 集合后, 取整体 Hausdorff 最小值的点作为最终匹配点。

4 实验与仿真分析

利用以上介绍的匹配方法, 可以进行实验仿真。仿真时取地表一小片区域内的地磁场做基准图 (地磁场异常值), 测量序列由真实轨迹的磁场大小加噪声组成, 噪声为高斯白噪声, 方差为 σ_N^2 。基准图的大小为 150×150 网格, 网格距离为 $100 \text{ m} \times 100 \text{ m}$, 网格点数据的均值为 1.8303 nT , 标准差为 16.8425 , 其目的在于说明匹配方法的可行性和结果分析, 实际运用时还应该具体分析磁场特征对匹配结果的影响。

以上匹配方法适用于载体做任意复杂运动, 为了简化分析, 设载体做匀速直线运动。初始条件为: 载体实际初始位置 $(X_0, Y_0) = (65, 70)$; 惯导初始位置 $(X_0, Y_0) = (75, 75)$; 位置误差 $\Delta X = \Delta Y = 30$; 速度 $v = 30 \text{ m/s}$; 方位 $\alpha = 60^\circ$;

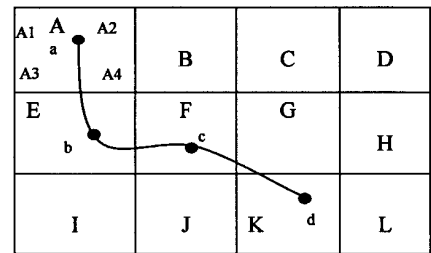


图 2 预匹配原理
Fig 2 Principle of pre-matching

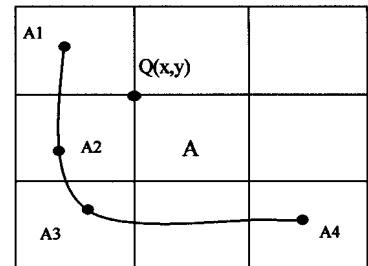


图 3 精匹配原理
Fig 3 Principle of precision-matching

采样周期 $T = 5 \text{ s}$; 可行度阈值 $\lambda = 0.5$ 。以上位置坐标及误差均为网格表示。

本仿真考虑的关键变化因素有: 匹配步长 N 和信噪比 $\text{SNR} = \sigma_T / \sigma_N$ 。仿真判断相关性时, 取相关曲面的谷点为最终匹配结果。如果相关曲面越尖锐陡峭, 表明极点的匹配相关性越强, 匹配信度越高。地磁场强度曲面和仿真相关曲面如图 4 所示。

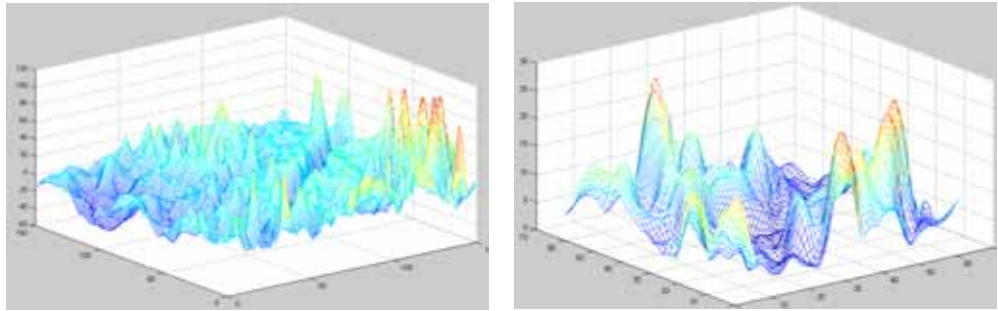


图 4 地磁场曲面与匹配相关曲面

Fig 4 The geomagnetic curve and matching correlative curve

实验中若最终匹配结果与真实网格坐标相等则称为精匹配, 此时的实际误差

在 100 m 以内; 若最终匹配结果与真实网格的差在一个格子以内称为次优匹配, 此时的实际误差为 200 m。在相同条件下 (只是测量序列的随机改变) 仿真 100 次, 精匹配和次优匹配的次数结果如表 1 所示。

由表可以看出, 在信噪比高与匹配长度足够长的情况下, 相关匹配算法具有较高的精确度和捕获概率, 这与理论分析一致。在低信噪比的情况下,

通过增加匹配长度可提高匹配概率, 但信噪比过低会导致系统不可用, 因此我们应当选择地磁区域特征明显且噪声较小的区域。匹配长度的增加会急剧增加计算量, 不利于惯导的实时性校正, 因此实际中应选取较为合适的匹配长度 N 。

表 1 地磁匹配仿真结果比较

Table 1 Comparison of geomagnetic matching emulation

匹配长度(N) 信噪比 (SNR)	10		15		20	
	精匹配	次优匹配	精匹配	次优匹配	精匹配	次优匹配
6	6	15	48	88	79	97
10	30	51	83	100	98	100
16	63	85	100	100	100	100
20	83	97	100	100	100	100

5 结 论

文中采用的批处理相关地磁匹配算法的优缺点如下所述。优点: 1) 对初始位置误差要求低; 2) 不必对磁场做任何线性化假设, 只要磁场变化特征明显就可以工作; 3) 求得的是全局最优解。缺点: 1) 可能产生虚假定位; 2) 对方位误差敏感。鉴于以上匹配算法的缺点, 我们还需进一步对匹配算法进行改进, 以满足地磁导航的实际工程应用。譬如为防止虚假定位, 采用 M/N 判决方案, 即在 N 次定位中至少有 M 次定位相一致才接受相关定位; 或是采用批处理相关技术与并行卡尔曼滤波技术相结合的匹配定位方法^[9, 10]。

参考文献:

- [1] 袁书明, 孙枫. 重力图形匹配技术在水下导航中的应用[J]. 中国惯性技术学报, 2004, 12(2): 13-17.
YUAN Shu-ming, SUN Feng. Application of gravity map technology in underwater navigation[J]. Journal of Chinese Inertial Technology, 2004, 12(2). 13-17.
- [2] 侯景儒. 地质统计学的理论与方法[M]. 北京: 北京地质出版社, 2003. 138-157.
HOU J R. Geologic statistic theory and method[M]. Beijing: Beijing Geologic Publication, 2003. 138-157.
- [3] 苏康. 自适应机动地形匹配算法[J]. 红外与激光工程, 2000, 29(2): 22-25.
SU Kang. Adaptive maneuvering terrain contour matching algorithm[J]. Infrared and Laser Engineering, 2000, 29(2): 22-25.
- [4] 朱永松. 基于相关系数的相关匹配算法的研究[J]. 信号处理, 2003, 35(2): 34-39.
ZHU Yong-song. The research of correlation matching algorithm based on correlation coefficient[J]. Signal Processing, 2003, 35(2).
- [5] 刘承香. 水下潜器的地形匹配辅助定位技术研究[D]. 哈尔滨工程大学博士学位论文, 2003: 21-88.
LIU Cheng-xiang. A study on terrain matching assistant positioning technology for under vehicle[D]. Harbin Engineering University, 2003: 21-88.
- [6] 沈庭芝. 一种改进的部分 Hausdorff 距离检测技术和遗传算法在图像匹配识别中的应用[J]. 通信学报, 2001, 22(12): 112-116.
SHEN Ting-zhi. One technique of improved Hausdorff distance and genetic algorithm in image matching recognition[J]. Journal of China Institute of Communication, 2001, 22(12): 121-116.
- [8] Baker W R and Clem R W. Terrain Contour Matching Primer[J]. Aeronautical Systems Division, 1997, 5: 23-30.
- [9] Barid C A, Abramson M R. A comparison of several digital map-aided navigation techniques[J]. New York: The Institute and Electronics Engineers Inc, 1984, 231-238.
- [10] Hollowell J. A Terrain Referenced Navigation Algorithm for Helicopters[J]. IEEE PLANS'90, 20-30 March 1990, 616- 625.
- [11] Rice H, Kelmenson S, Mendelsohn L. Geophysical navigation technologies and applications[C]//Position Location and Navigation Symposium, 26-29 April 2004. 618-624.