

地磁导航的迭代评价匹配算法

黄斌¹ 孙永荣¹ 王丽娜² 刘建业¹ 高晓颖²

(1. 南京航空航天大学自动化学院, 南京, 210016;

2. 北京航天自动控制研究所宇航智能控制技术国家级重点实验室, 北京, 100854)

摘要:针对现有地磁匹配基本算法在数据批处理上实时性能的不足和需要预先指定匹配数据序列长度的困难, 提出了一种用于地磁导航的迭代评价匹配算法(Iterative evaluation matching algorithm, IEMA)。基于迭代求解思想, 将算法时间分散在各个采样时刻, 同时采用实时评价方式, 在每一步迭代求解后根据实际情况来判断是否可以输出匹配定位结果。试验结果表明, 迭代评价匹配算法应用于地磁导航是有效可靠的, 并且它能够自适应调整匹配数据序列的长度。

关键词:地磁导航; 迭代算法; 实时评价; 迭代评价匹配算法

中图分类号: V249.3

文献标识码: A

文章编号: 1005-2615(2012)04-0565-05

Iterative Evaluation Matching Algorithm for Geomagnetic Navigation

Huang Bin¹, Sun Yongrong¹, Wang Lina², Liu Jianye¹, Gao Xiaoying²

(1. College of Automation Engineering, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing, 210016, China;

2. National Key Laboratory of Science and Technology on Aerospace Intelligent Control, Beijing Aerospace Automatic Control Institute, Beijing, 100854, China)

Abstract: Basic algorithms for geomagnetic matching have bad real-time performance in data batch processing, and these basic algorithms have to specify the length of matching sequence data in advance. To solve these two problems, the iterative evaluation matching algorithm (IEMA) is presented for geomagnetic navigation. IEMA learns from the iterative idea, which makes the calculation time distribute in each sampling time and IEMA uses real-time evaluation, which can determine whether to output the matching positioning results after one iterative solution. Results show that IEMA is effective and reliable in geomagnetic navigation, and it can adjust the length of matching sequence data adaptively.

Key words: geomagnetic navigation; iteration algorithm; real-time evaluation; iterative evaluation matching algorithm

地磁场是地球的基本物理场, 在地球近地空间, 理论上任何一点的磁场强度矢量和地理位置(经度、纬度、高度)是一一对应的, 通过确定各点的地磁强度矢量就可以实现全球定位^[1-3]。地磁导航不需要接收外部信息, 具有自主性、隐蔽性、误差不随时间累积等特点, 且能够工作在地形特征不明显的区域(如平原、海洋、沙漠等), 因此可用来辅助惯导系统为航

空器导航定位, 具有重要的军事应用价值。

地磁匹配是利用地磁场的一种基于数据库查询的自主式导航方法, 它利用磁传感器采集载体所处地理位置的地磁信息, 将工作一段时间所得到的地磁数据序列, 与预先存储在计算机中的地磁数据库进行比较, 查询出最佳匹配序列和对应的地理位置。

基金项目: 国家自然科学基金(91016019)资助项目。

收稿日期: 2011-10-13; 修订日期: 2012-03-08

通讯作者: 孙永荣, 男, 教授, 博士生导师, 1969年生, E-mail: sunyr@nuaa.edu.cn。

目前可采用的地磁匹配导航算法有很多,主要可以分为两类:(1)相似度量算法^[4],其思想是指定一个准则来评价实测地磁数据序列和地磁数据库搜索空间中的待比较地磁数据序列之间的相似度,常用的有平均绝对差算法(MAD)、平均平方差法(MSD)、积相关法(PROD法)和Hausdorff距离度量法;(2)等值线匹配算法(ICCP)^[5-7],其思想是借鉴图形匹配中的ICP算法,通过计算惯导输出位置序列的刚性变换,使其接近其对应等磁线最近点序列,不断迭代该过程,最终实现地磁实测数据序列与地磁数据库中地磁图的配准。

相似度量算法原理简单可靠,适用范围广,对初始误差要求低,能得到全局最优的匹配结果,应用于地磁匹配时具有较高的匹配精度和捕获概率,但是由于一般搜索数据库较大,因此相似度量算法耗时较长,实时性能较差。谢仕民等对几种用于地磁匹配的相似度量算法进行了仿真研究,结果表明基于Hausdorff距离的匹配算法具有更高的抗干扰能力和容错能力^[8]。

等值线匹配算法采用图形刚性变换方法,可得到比基于网格搜索的相似度量算法更高的匹配精度,且基于等值线的搜索方式耗时相对较少,但是等值线匹配算法要求惯导初始位置误差较小,且测量数据中没有野值点,算法复杂,鲁棒性较差。郭庆等针对地磁场数据的缓变特性,研究了地磁场特征量等磁线的交叉特性,并提出了一种新的、有效的地磁匹配双等值线(DICCP)算法,仿真结果表明DICCP算法能够得到比ICCP算法更高的匹配精度^[9]。

以上所述的地磁匹配算法都是数据批处理方法,实时性能较差,且需要根据经验或试验结果来预先指定匹配数据序列的长度^[10]。为此,本文将对基于迭代评价匹配的地磁导航算法开展研究,以提高

算法的实时性,克服预先指定匹配序列长度的困难。

1 迭代评价匹配算法

1.1 算法描述

用于地磁导航的迭代评价匹配算法,需要作出如下假设:

- (1)惯导系统不存在航向误差,或航向误差较小;
- (2)在匹配区域内地磁场强度值具有连续性,且在数据库的一个单位网格范围内变化均匀;
- (3)已知或能估计出磁传感器测量误差的统计特性;
- (4)已知惯导系统初始位置误差范围。

迭代评价匹配算法的基本过程如下:根据当前采样时刻惯导输出位置和磁传感器输出地磁值,更新偏移矩阵和偏移评价矩阵,并求出当前采样时刻的地磁匹配定位结果评价因子。其中偏移矩阵用来存储惯导输出位置偏移量的可行解,偏移评价矩阵用来评价每个偏移量可行解的可信度。该算法可以按时间迭代进行,并且能够根据匹配定位结果评价因子来判断是否输出地磁匹配定位结果。

如图1所示为迭代评价匹配算法的过程示意图, x 表示惯导输出的轨迹, m 表示当前时刻的地磁测量值, p 表示其测量误差, X 表示偏移矩阵对应的可行解区域。随着时间迭代计算,根据惯导输出数据和地磁测量数据求出的偏移矩阵对应的可行解区域越来越小(图1中的 X_1, X_2 到 X_n),直到某一时刻(图1中的采样时刻 n)只有一个可行解(图1中的 y_n)时,迭代计算结束,并将该可行解作为地磁匹配结果(图1中的 y_n 对应的偏移量即为地磁匹配定位结果)。

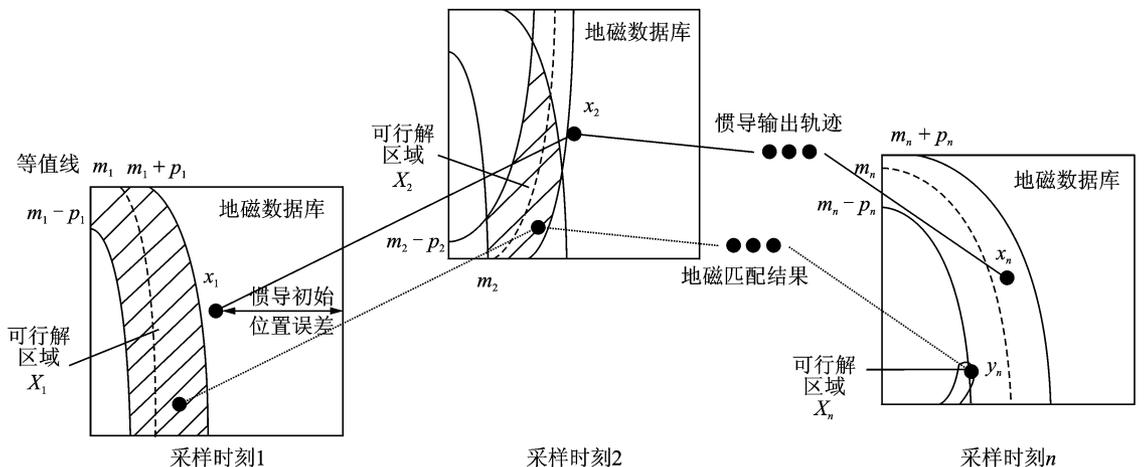


图1 迭代评价匹配算法过程示意图

1.2 算法实现

地磁数据库的网格单位规格为 $d_x \times d_y$ (其中 x 表示经度, y 表示纬度), 磁传感器的测量标准差为 σ_v , 惯性导航系统的初始位置误差为 $\delta_p^{(0)} = (\delta_x^{(0)}, \delta_y^{(0)})$, 记在采样时刻 k , 惯导输出位置为 $p_0^{(k)} = (x_0^{(k)}, y_0^{(k)})$, 磁传感器输出地磁值为 $v_0^{(k)}$ 。图2所示为迭代评价算法的流程图, 具体实现步骤如下:

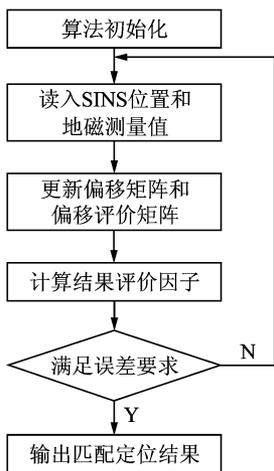


图2 迭代评价匹配算法流程图

(1) 算法初始化

载入惯性导航系统输出位置附近的地磁数据库, 并启动地磁匹配导航算法。根据惯性导航系统初始位置误差和磁传感器测量误差确定初始偏移矩阵和初始偏移评价矩阵。

① 计算偏移矩阵的中心坐标 $(O_x^{(0)}, O_y^{(0)})$

$$\begin{aligned} O_x^{(0)} &= \delta_x^{(1)} / d_x \\ O_y^{(0)} &= \delta_y^{(1)} / d_y \end{aligned} \quad (1)$$

② 计算偏移矩阵大小为 $N_x^{(0)} \times N_y^{(0)}$

$$\begin{aligned} N_x^{(0)} &= 2O_x^{(0)} + 1 \\ N_y^{(0)} &= 2O_y^{(0)} + 1 \end{aligned} \quad (2)$$

③ 初始化偏移矩阵和偏移评价矩阵

记偏移矩阵为 $T^{(0)} = (t_{ij}^{(0)})$, 偏移评价矩阵为 $S^{(0)} = (s_{ij}^{(0)})$, $i = 1, 2, 3, \dots, N_x^{(0)}$; $j = 1, 2, 3, \dots, N_y^{(0)}$ 。偏移矩阵和偏移评价矩阵的所有元素均初始化为1。

(2) 时间迭代计算

根据当前 k 采样时刻的惯性导航系统输出位置和磁传感器输出地磁值, 更新偏移矩阵和偏移评价矩阵。

① 查询地磁数据: 在偏移矩阵 $T^{(k-1)}$ 中, 对所有满足 $t_{ij}^{(k-1)} = 1$, $i = 1, 2, 3, \dots, N_x^{(0)}$; $j = 1, 2, 3, \dots, N_y^{(0)}$ 的索引坐标 (i, j) , 并求出对应的实际地理位置坐标 $p_{ij}^{(k)} = (x_{ij}^{(k)}, y_{ij}^{(k)})$, 其中

$$\begin{aligned} x_{ij}^{(k)} &= x_0^{(k)} + (i - O_x^{(0)} - 1)d_x \\ y_{ij}^{(k)} &= y_0^{(k)} + (j - O_y^{(0)} - 1)d_y \end{aligned} \quad (3)$$

然后在地磁数据库中查询出地理位置 $p_{ij}^{(k)}$ 对应的地磁值 $v_{ij}^{(k)}$ 。

② 更新偏移矩阵: 对①中的所有可行解, 如果 $v_{ij}^{(k)} \in [v_0^{(k)} - 3\sigma_v, v_0^{(k)} + 3\sigma_v]$, 则令 $t_{ij}^{(k)} = 1$; 对于偏移矩阵中的其他元素, 均令 $t_{ij}^{(k)} = 0$ 。

③ 更新偏移评价矩阵: 在②得到的偏移矩阵 $S^{(k)}$ 中, 对于满足 $t_{ij}^{(k)} = 1$ 的可行解, 令

$$\begin{aligned} s_{ij}^{(k)} &= s_{ij}^{(k-1)} g(v_{ij}^{(k)} - v_0^{(k)}) \\ i &= 1, 2, 3, \dots, N_x^{(0)} \\ j &= 1, 2, 3, \dots, N_y^{(0)} \end{aligned} \quad (4)$$

式中: $g(\cdot)$ 表示磁传感器测量误差的概率分布函数, 一般可选为标准正态分布函数。对于偏移评价矩阵中的其他元素, 均令 $s_{ij}^{(k)} = 0$ 。

(3) 匹配结果判断

计算当前 k 采样时刻的匹配结果评价因子, 并判断是否输出当前匹配定位结果。

① 计算偏移矩阵 $S^{(k)}$ 中元素值为1的所有元素(所有可行解)之间关于索引坐标的最大距离, 包括经度方向和纬度方向。

② 对于①中的结果, 利用地磁数据库的网格单位规格 $d_x \times d_y$, 将该最大距离转换成实际地理长度, 即为地磁匹配结果评价因子 $r^{(k)} = [r_x^{(k)}, r_y^{(k)}]$ 。

③ 判断 $r^{(k)}$ 是否在预定的位置允许误差范围 R 内。如果满足误差要求, 则求出偏移评价矩阵中的最大元素 $s_{mn}^{(k)}$, 利用索引坐标 (m, n) 求出对应地理位置

$$\begin{aligned} q^{(k)} &= (q_x^{(k)}, q_y^{(k)}) \\ q_x^{(k)} &= x_0^{(k)} + (m - O_x^{(0)} - 1)d_x \\ q_y^{(k)} &= y_0^{(k)} + (n - O_y^{(0)} - 1)d_y \end{aligned} \quad (5)$$

作为地磁匹配定位结果输出, 地磁匹配算法停止; 如果不满足误差要求, 返回步骤(2)。

2 仿 真

2.1 算法正确性验证试验

该试验的目的是验证迭代评价匹配算法的正确性, 设定仿真条件如下: (1) 地磁数据库范围。经度方向为 $116.0 \sim 117.99^\circ$, 纬度方向为 $31.0 \sim 32.99^\circ$; (2) 地磁数据库的网格单位规格。经度方向为 0.01° , 纬度方向为 0.01° ; (3) 磁传感器测量值标准差为 1 nT , 测量误差服从标准正态分布; (4) 惯导初始位置误差范围。经度方向为 0.1° , 纬度方向为 0.1° , 初始位置误差值采用正负对称、均匀分布的随机常数; (5) 运载体飞行轨迹为直线段。

在上述仿真条件下,采用迭代评价匹配算法来进行地磁匹配导航,仿真结果如图3所示。从图3可以看出,经过6次迭代计算,偏移矩阵中只剩下一个可行解,因此在采样时刻6就可以将该可行解作为地磁匹配定位结果输出,同时从图3中可以看出地磁匹配定位结果与真实轨迹基本重合。试验结果表明,迭代评价匹配算法用于地磁匹配导航是有效可靠的。

另外,从迭代评价匹配算法原理上看,运载体的真实位置肯定会存在于可行解空间中,当设定“只有一个可行解才输出匹配定位结果”作为匹配结果判断条件时,IEMA算法输出的定位误差在地磁数据库单位网格范围内,因此,地磁导航精度与地磁数据库网格精度相当。

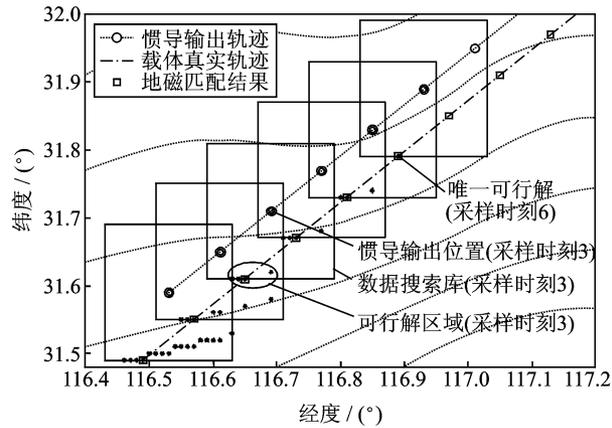


图3 迭代评价匹配算法地磁匹配结果

2.2 匹配序列长度仿真试验

该试验的目的是研究不同误差情况下完成匹配定位需要的数据序列长度,设定仿真试验条件如下:(1)地磁数据库范围。经度方向为 $116.0 \sim 119.99^\circ$,纬度方向为 $31.0 \sim 34.99^\circ$;(2)地磁数据库的网格单位规格。经度方向为 0.01° ,纬度方向为 0.01° ;(3)磁传感器测量值标准差为 0.5 nT ,测量误差服从标准正态分布;(4)惯导初始位置误差范围。经度方向为 0.1° ,纬度方向为 0.1° ,初始位置误差值采用正负对称、均匀分布的随机常数;(5)运载体飞行轨迹为直线段。

在上述仿真条件下,采用迭代评价匹配算法来进行地磁匹配导航,共进行500次试验,试验结果如表1所示。从表1可以看出,在99%的情况下,采用长度为11的匹配数据序列就可以得到匹配定位结果。试验结果表明,迭代评价匹配算法能够根据惯导输出和实测地磁数据自适应调整匹配数据序列的长度,以期得到有效的匹配定位结果。

表1 匹配数据序列长度试验结果

序列长度 L	1	2	3	4	5
统计次数 N	1	2	11	20	49
序列长度 L	6	7	8	9	10
统计次数 N	70	63	23	50	117
序列长度 L	11	12	13	14	15
统计次数 N	89	4	0	1	0

2.3 对比试验

该试验的目的是分析比较地磁匹配基本算法与迭代评价匹配算法在实时性能、可靠性和定位精度等方面的性能。选用地磁总强度作为匹配特征量,并设定与2.1节相同的仿真试验条件,分别采用迭代评价匹配算法和MSD算法进行地磁匹配。在Pentium(R) 4 CPU 3.00 GHz处理器、1 GB内存的计算机上,基于MATLAB R2007b编程环境进行仿真试验,某次的试验结果如表2,3所示。其中,表2为迭代评价匹配算法的试验结果,表3为MSD算法的试验结果。

表2 某次迭代评价匹配算法试验结果

迭代步数	每步迭代耗时/s	是否满足定位精度
1	0.001 263	否
2	0.003 696	否
3	0.000 921	否
4	0.005 111	否
5	0.004 092	否
6	0.003 680	是

表3 某次MSD算法试验结果

序列长度	算法总耗时/s	是否满足定位精度
4	0.403 988	否
5	0.376 738	否
6	0.547 429	否
7	0.655 703	否
8	0.392 519	否
9	0.416 328	是

对比表2,3,可以看出在一个地磁导航周期内迭代评价匹配算法耗时远远小于MSD算法耗时,体现了迭代评价匹配算法在导航实时性能上的优势。还有,迭代评价匹配算法在6个地磁采样周期内就获得了准确的定位结果,而MSD算法需要9个地磁采样周期,当少于9个地磁采样周期时,MSD算法出现了误定位的情况,说明了MSD算法难以预先指定匹配数据序列长度的问题。

多次仿真试验的结果均验证了以下结论:迭代评价匹配算法较MSD算法具有较好的实时性能,且MSD算法在匹配序列长度较小时容易出现误差

位的情况,另外,迭代评价匹配算法得到准确结果所需要的地磁采样点数往往小于MSD算法。

3 结束语

本文首先研究了现有的两类地磁匹配基本算法,分析了它们的原理和特点,然后提出了一种新的地磁匹配算法——迭代评价匹配算法,该算法借鉴了迭代求解思想,将算法时间分散在各个采样时刻,克服了地磁匹配基本算法在数据批处理上耗时较多的不足,并采用实时评价的方式,即在每一步迭代求解后根据实际测量数据来判断是否可以输出匹配结果,避免了地磁匹配基本算法需要预先指定匹配数据序列长度的困难。仿真试验结果表明,迭代评价匹配算法应用于地磁匹配是有效可靠的,并且它能够自适应调整匹配数据序列的长度。

参考文献:

- [1] 郭才发,胡正东,张士峰,等. 地磁导航综述[J]. 宇航学报,2009,30(4):1314-1320.
Guo Caifa, Hu Zhengdong, Zhang Shifeng, et al. A survey of geomagnetic navigation [J]. Journal of Astronautics, 2009, 30(4): 1314-1320.
- [2] Goldenberg F. Geomagnetic navigation beyond magnetic compass [C]//PLANS 2006. San Diego, California:[s. n.], 2006: 684-694.
- [3] Tyren C. Magnetic terrain navigation [C]//Proceedings of the 1987 5th International Symposium on Unmanned Untethered Submersible Technology. [S. l.]: Marine Systems Engineering Laboratory, University of New Hampshire, 1987: 245-256.
- [4] 刘飞,周贤高,杨晔,等. 相关地磁匹配定位技术[J].

中国惯性技术学报,2007,15(1):59-62.

- Liu Fei, Zhou Xiangao, Yang Ye, et al. Geomagnetic matching location using correlative method [J]. Journal of Chinese Inertial Technology, 2007, 15(1): 59-62.
- [5] Besl J P, McKay D N. A method for registration of 3-D shapes [J]. IEEE Trans on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1992, 14(2): 239-256.
- [6] Zhang Z. Iterative points matching for registration of free form curves and surfaces [J]. Computer Vision, 1994, 13(2): 119-152.
- [7] 吴美平,刘颖,胡小平. ICP算法在地磁辅助导航中的应用[J],航天控制,2007,25(6):17-21.
Wu Meiping, Liu Ying, Hu Xiaoping. Application of ICP algorithm in geomagnetism aided navigation system [J]. Aerospace Control, 2007, 25(6): 17-21.
- [8] 谢仕民,李邦清,刘峰,等. 基于Hausdorff距离的地磁匹配算法研究[J]. 战术导弹技术,2008(5):59-62.
Xie Shimin, Li Bangqing, Liu Feng, et al. Study of MAGCOM algorithm based on hausdorff distance [J]. Tactical Missile Technology, 2008(5): 59-62.
- [9] 郭庆,魏瑞轩,胡明朗,等. 地磁匹配双等值线算法仿真研究[J]. 系统仿真学报,2010,22(7):1576-1579.
Guo Qing, Wei Ruixuan, Hu Minglang, et al. Research on dual iterative closet contour point algorithm for geomagnetic matching [J]. Journal of System Simulation, 2010, 22(7): 1576-1579.
- [10] 刘颖,吴美平. 地磁匹配中的匹配长度估计方法[J],中国惯性技术学报,2010,18(4):439-443.
Liu Ying, Wu Meiping. Match length estimation in geomagnetic matching system [J]. Journal of Chinese Inertial Technology, 2010, 18(4): 439-443.