

文章编号: 1001- 2486(2010) 06- 0171- 06

# 地磁匹配算法研究框架和组合匹配策略\*

刘颖, 吴美平, 谢红卫

(国防科技大学 机电工程与自动化学院, 湖南 长沙 410073)

**摘要:**以空中无人平台为背景,研究了地磁辅助惯性导航系统。分析了地磁匹配的特点,给出了一维匹配的概念。从特征空间、相似性度量、搜索空间、搜索策略等四个方面对一维匹配进行了分析,建立了一个地磁匹配方法研究的框架。通过简化惯导解算过程,将一维地磁匹配归结为一个带补偿过程的仿射变换,并提出了一种基于等值线约束的组合匹配算法。该算法兼顾了匹配的全局搜索能力和局部定位能力,能在飞行过程中在线进行。在仿真和车载实验中,对算法的匹配精度、速度、适应性进行了分析和验证,检验了算法的有效性和可行性。

**关键词:**地磁辅助导航; 优化搜索; 等值线约束; 组合匹配

中图分类号: V24 文献标识码: A

## A Framework for Magnetic Matching Study and an Integrated Matching Method

LIU Ying, WU Mei ping, XIE Hong wei

(College of Mechatronics Engineering and Automation, National Univ. of Defense Technology, Changsha 410073, China)

**Abstract:** Geomagnetism aided inertial navigation system for unmanned aerial vehicles was studied. An analysis was presented for the whole magnetic matching process. "One dimension matching" concept was first used and analyzed in view of its feature space, similarity metric, search space and search strategy, upon which a framework for matching methods study was built. Through simplification of inertial computational process, one dimension magnetic matching can be considered as an affine transformation problem with compensation. A contour constraint based iterative coarse fine two stage matching method was proposed to get the best transformation parameters, in which global search ability and localization precision were both considered. Simulation and real experiment results show the improvements in matching precision, speed and adaptability.

**Key words:** geomagnetism aided inertial navigation; optimized search process; contour constraint; integrated matching strategy

随着地磁传感器的发展和地磁数据库的完善,地磁测量的完全被动性使得地磁场在军事领域有了广阔的应用前景,成为无人机、导弹、潜艇等隐秘作战平台的辅助导航手段<sup>[1-3]</sup>。类似于地形特征,地磁场在局部区域内的分布与实际的地理位置有很大的相关性。在载体运行过程中,把航迹上积累的地磁测量与预先存储的地磁图进行相关运算即可得到载体的实时位置,这就是地磁匹配的概念。地磁匹配既可以工作于批处理(或间歇)模式,又可以进行实时迭代,误差不随时间积累,是导航系统进行重调的理想观测依据。

“空中无人平台”这一应用背景为地磁导航提供了广阔的发展空间。众所周知,地磁测量抗干扰性能比较差,在地面平台上极易受周围物体和环境的影响,降低了其导航性能。而空中平台可以给地磁导航提供一个相对“干净”的测量环境,为实现高精度地磁匹配奠定了基础。另外,相对于地形匹配,地磁导航系统在水面、冰面等“平坦”区域可照常运行,实用性更强。

地磁辅助导航并不是一个全新的概念,国内外在此领域已取得一些成果<sup>[1,4-11]</sup>,但在匹配算法的理论分析和适应性分析方面的结论比较少。文中以空中无人平台为应用背景,系统地分析了地磁匹配的

\* 收稿日期: 2010- 05- 03

基金项目: 国家部委资助项目

作者简介: 刘颖(1979-),女,博士生。

特点,给出了一维匹配的概念和模型,提出了基于等值线约束的组合匹配算法。仿真和实验均验证了算法的优良性能。

## 1 地磁匹配特征分析和匹配模型

### 1.1 地磁匹配四元素

匹配技术在图像处理领域已发展得比较成熟,按照图像匹配中经典的 Brown 理论<sup>[12]</sup>:各种匹配算法均是以下四元素的不同组合:特征空间、相似性度量、搜索空间、搜索策略。以下从这四方面入手进行分析,为地磁匹配算法研究提供一个参考框架。

#### (1) 特征空间(feature space)

从输入信息量的角度考虑,定义以一维向量形式输入的匹配过程为一维匹配,相应的图像匹配就是二维匹配。非阵列测量的地形匹配和重力匹配都属于一维匹配。

特征空间是指匹配所依据的数据空间。相比于图像匹配,地磁匹配的特征空间比较小,没有图像中的灰度特征、纹理特征、区域特征等,可用信息主要是沿航迹的地磁测量序列及相应的统计特性。按照基元的不同,一维匹配大致可以分为:基于数据的算法和基于特征的算法。前者是一个直接数据相关的概念;基于特征的算法要首先提取测量序列的内在特性,如剖面曲线的起伏特性、序列的统计特性、频域特性等。

特征量的选择对匹配性能影响很大。根据现代地磁理论<sup>[13]</sup>,地磁场强度主要由三部分构成:主磁场、异常场和干扰场。低空无人平台的飞行高度从几十米到几千米以上,在此高度上干扰场几乎可以忽略不计。丰富的地磁特征是地磁匹配成功的关键,地磁异常图包含了更多的细节信息,时间稳定性好;另外,匹配过程要求在较短的时间内体现出航迹上地磁分布的唯一性,因此高振幅、短波长的地磁异常场是研究地磁匹配方法的首要选择。

#### (2) 相似性度量(similarity metric)

无论是基于数据的算法还是基于特征的算法,都需要在一定的相似性准则下进行。不同的特征空间有不同的相似性测度,对于二维基于区域的匹配,可以采用互相关、互信息等相似性测度。一维的匹配过程中,无论是直接数据关联还是特征关联,都是一个距离度量的概念,属于数据关联的范畴。数据关联中常用的相关性准则有积相关、归一化积相关、平均绝对差、均方差等<sup>[14]</sup>。

#### (3) 搜索空间(search space)

从算法上分析,一维匹配问题实际上是一个参数的最优估计问题,待估计参数组成的空间即搜索空间<sup>[15]</sup>。在地磁匹配中,搜索空间是指待匹配航迹与最优估计航迹之间所有可能的变换组成的空间。从航迹的角度来说,就是所有待匹配航迹的集合。搜索空间的大小决定了算法的计算量和实时性,是工程算法设计必须考虑的参数。

#### (4) 搜索策略(search strategy)

搜索策略就是在搜索空间中寻找满足相似性度量的最优变换参数的方法。在特征空间相对简单的一维匹配中,搜索策略可以决定特征空间的生成和复杂程度,决定着整个匹配过程的计算量和精度,是算法的核心。无人机飞行速度快,对算法的实时性要求很高,因此实际应用中往往需要借助最优化算法来实现最优估计。算法既要有广泛的全局搜索能力,又要有精确的局部定位能力,是算法研究的难点。

根据应用背景需求,选择合适的地磁特征量,然后依循搜索策略在搜索空间中寻找满足相似性度量结果的过程就是地磁匹配。四要素为地磁匹配方法研究提供了一个结构框架,四要素内容的不同组合构成了不同的匹配算法。

### 1.2 地磁匹配数学描述

无人机执行任务过程中处于全自主状态,进入匹配区域时,系统误差特性不一。匹配前产生的积累误差和匹配过程中的积累误差对轨迹形变有不同程度的影响。因此,模型建立和算法设计时必须充分考虑各种误差因素的影响,使算法在各种状况下都能有效运行。从惯导解算模型出发,结合惯性传感器

的性能指标和飞行器的运动特点,对地磁匹配过程进行了数学描述,并建立了简化仿射模型。

从匹配原理上来看,匹配过程可由以下两个方程描述

$$\text{航迹信息: } s_i = f(s_r + \Delta p_0) + w \quad (1)$$

$$\text{测量信息: } Y_k = h^k(s_r) + \alpha_k \quad (2)$$

其中,  $s_i$  为惯导指示航迹,  $s_r$  为真实航迹,  $\Delta p_0$  为匹配开始时刻的初始定位误差,  $w$  为定位误差噪声;  $Y_k$  为  $k$  时刻沿轨迹实时测量的地磁异常序列,  $h(\cdot)$  为读图函数,  $\alpha_k$  为测量误差和噪声。匹配的目的是根据  $s_i$  和  $Y_k$  中包含的信息,通过计算确定系统的初始定位误差  $\Delta p_0$  以及航迹变换关系  $f(\cdot)$  的最优估计,其实质是一个空域变换。下面从惯导系统的误差特性和无人机运动特征出发对匹配过程进行简化。

首先分析匹配开始之前,系统的误差状态。在惯导系统中,忽略哥氏项误差和重力矢量误差后,速度误差  $\delta$  是比力  $f^n$ 、姿态误差  $\Psi$  和因加速度计不精确带来的比力测量误差  $\mathcal{F}^b$  的函数<sup>[12]</sup>。速度误差的微分方程可以表示为

$$\dot{\delta} = [f^n \times] \Psi + C_b^n \mathcal{F}^b \quad (3)$$

其中,  $C_b^n$  是载体坐标系到导航系的转移矩阵。进入匹配区时,由于误差对时间的积分,系统已积累产生了一定的位置误差  $\Delta p_0$ 、速度误差  $\delta$  和姿态误差  $\Psi$ 。

数据积累结束地磁匹配计算之前,惯导系统给出的速度为

$$v_i^i = v_i^r + \delta + \varepsilon(\mathcal{F}^b, \Psi, t) \quad (4)$$

其中,  $v_i^i$  为  $t$  时刻惯导指示速度;  $v_i^r$  为  $t$  时刻实际速度;  $\varepsilon$  为匹配过程中速度误差的变化量,主要由  $\mathcal{F}^b$  和  $\Psi$  引起。在匹配过程中,  $\delta$  在匹配前产生,可看作常值误差,易于处理;但是  $\varepsilon$  是时间和  $\Psi$  的函数,且  $\Psi$  也随时间积累。考虑到飞行器速度快,每次匹配所用时间短(一般只有几秒钟),且目前主流航空陀螺精度能达到  $0.01(^{\circ})/h$ ,短时间内姿态误差积累很小,因此假设:地磁匹配数据积累阶段,系统姿态误差保持不变。

即在整個匹配过程中,  $\Psi$  不随时间积累,因而  $\varepsilon$  成为时间的一个线性函数。另外,考虑在地磁辅助导航期间,用  $\varepsilon$  的均值  $\bar{\varepsilon}$  代替整条误差直线,使得整个匹配过程成为一个常速度误差过程。速度误差为

$$\Delta v = \delta + \bar{\varepsilon} \quad (5)$$

匹配过程中,有

$$v_i^i = v_i^r + \Delta v \quad (6)$$

如果记进入匹配区的时刻为 0 时刻,采样间隔为  $\Delta t$ ,那么惯导系统位置更新方程的离散化形式为

$$\hat{p}_{k+1} = \hat{p}_k + v_k^i \Delta t \quad (7)$$

$$\hat{p}_k = p_k + \Delta p_0 + \Delta v(k \cdot \Delta t) \quad (8)$$

$p_k$  为载体真实位置。把速度方程式(6)和  $\hat{p}_k$  代入式(7),得

$$\begin{aligned} \hat{p}_{k+1} &= p_k + \Delta p_0 + \Delta v(k \cdot \Delta t) + (v_k^r + \Delta v) \cdot \Delta t \\ &= (p_k + v_k^r \Delta t) + \Delta p_0 + \Delta v \cdot (k \cdot \Delta t) + \Delta v \Delta t \\ &= p_{k+1} + \Delta p_0 + \Delta v \cdot (k+1) \cdot \Delta t \end{aligned} \quad (9)$$

$[\Delta p_0 + \Delta v \cdot (k+1) \cdot \Delta t]$  即为最终的误差项。可见,载体的位置误差主要由两部分构成:匹配前系统的位置误差  $\Delta p_0$  和由速度误差引起的位置增量误差  $\Delta v \cdot (k+1) \cdot \Delta t$ 。体现在轨迹变化上可以简化为一个曲线间的仿射变换,涉及参数包括平移、旋转、缩放,分别对应匹配系统的初始位置误差、航迹偏航和速率误差。其数学描述如下:

$$\begin{pmatrix} x' \\ y' \end{pmatrix} = S \begin{pmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} t_x \\ t_y \end{pmatrix} \quad (10)$$

$\theta$  是主要由航向误差和速度误差引起的航迹偏航角,  $S$  为缩放速率因子,  $t_x$ 、 $t_y$  为平移因子。一维匹配的目的就是通过各种搜索算法找出这几个变换因子,从而估计出载体的位置。

“常误差”假设是引起模型误差的主要来源,希望通过约束来减少模型误差的影响。在地磁图上,唯一存在的约束就是实际位置点必定位于对应测量值的等值线上。因此在仿射变换结果的基础上可以通过等值线约束来限制匹配过程中惯导误差的积累。即认为位置 $(x_i, y_i)$ 必定位于相应的磁测量值 $M_i$ 对应的等值线上。

$$(x_i, y_i) \in \text{Contour}(M_i) \quad (11)$$

因此可以在仿射变换结果的基础上通过等值线约束来限制匹配过程中惯导误差的积累。具体补偿细节将在下一节介绍。

## 2 基于等值线约束的组合匹配算法

从匹配模型可以看出,地磁匹配主要是一个设计搜索策略、确定仿射模型中旋转、平移、缩放参数的过程。在匹配区域中,足够小步长的三重遍历循环即可得到最优解,但是非常耗时,因此实际应用中往往需借助最优化算法来实现。理想的最优化算法既要有广泛的全局搜索能力,又要有精确的局部定位能力。这里提出了一种基于等值线约束的组合匹配算法(Contour Constraint based Integrated Matching, CCIM),算法从遍历过程演化而来,兼顾了全局搜索和局部定位能力;同时等值线约束和粗精结合策略满足了系统的实时性要求。航迹形变比较大时,采用最邻近等值线点对误差进行补偿,能有效消除匹配过程中的积累误差。

在优化搜索开始之前,首先要确定待匹配航迹的位置,即航迹上初始点的位置。文献[8]中提出的等值线约束法是一种用地磁等值线辅助确定匹配起始区域的方法,是一个把不确定域转换为不确定曲线的过程,能大大减少算法的计算量。本算法仍然采用了这一策略。

寻找最优变换的过程要依赖于一定的搜索策略。为解决匹配精度和匹配速度之间的矛盾,采用了粗精两级组合匹配算法。初始定位阶段采用大步长扫描,根据相似性测量标准,选择最相近的几个待匹配航迹(一般3~5个),称为最优待选值;然后在最优待选值处进行小步长扫描,最终得到全局最优解。粗精两级匹配能在兼顾匹配精度的基础上,大大减少系统的计算量,使算法能适应高速运动载体。

空中飞行器配备的惯性传感器精度较低,国外主流航空陀螺精度能达到 $0.01(^{\circ})/h$ ,差的大于 $100(^{\circ})/h$ 。在低惯组精度条件下,短时间内便会积累很大的误差;另外,当地磁特征不明显,匹配数据积累时间比较长时,积累的误差也无法忽略。这两种情况下,必须对仿射变换后的结果进行补偿。在补偿算法里,仿射变换后的航迹称为预测航迹,航迹上的采样点称为预测点。在每一个预测点周围,与真实定位点磁场强度相等的点不止一个,其相应的等值线上的点都可能是真正的航迹定位点。这是一个典型的相关问题,解决方法很多,如概率相关、多模型相关等,考虑到应用背景中的效率需求,采用了简单的“最近邻”方法,认为离预报点最近的等值线点即为所求。“最近邻”法在最大似然意义下是最优的<sup>[14]</sup>。

进行补偿的条件是经过大量仿真得到的:(1)对500s以内的匹配过程,当陀螺漂移大于 $5(^{\circ})/h$ 时,轨迹会很快变形,可以进行补偿;(2)数据积累长度大于3km时,进行补偿。组合匹配流程如图1所示。

## 3 仿真和实验验证

为了验证组合匹配算法的性能,采用多幅地磁图、多个轨迹,在不同惯导系统精度下进行了仿真,并从匹配精度、匹配速度、匹配的适应性三个方面进行了分析。地磁异常数据由美国地质勘探局(United States Geological Survey)提供,地磁图网格间距200m,地磁测量噪声方差50。

仿真1:初始位置误差(1000, 1200) m,初始速度误差(2, 6) m/s,初始航向误差 $0.01^{\circ}$ ,陀螺漂移 $1(^{\circ})/$

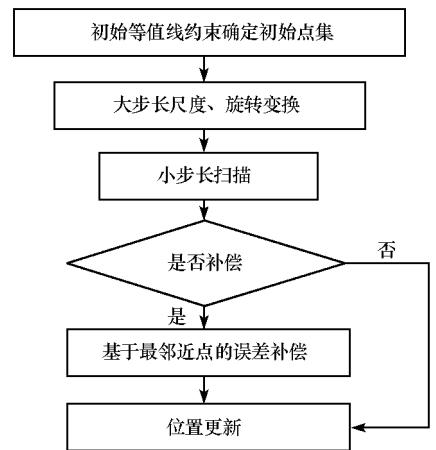


图1 组合匹配流程  
Fig. 1 Flow chart of integrated matching

h, 加表零偏  $100\mu\text{g}$ 。仿真结果如图 2 所示。

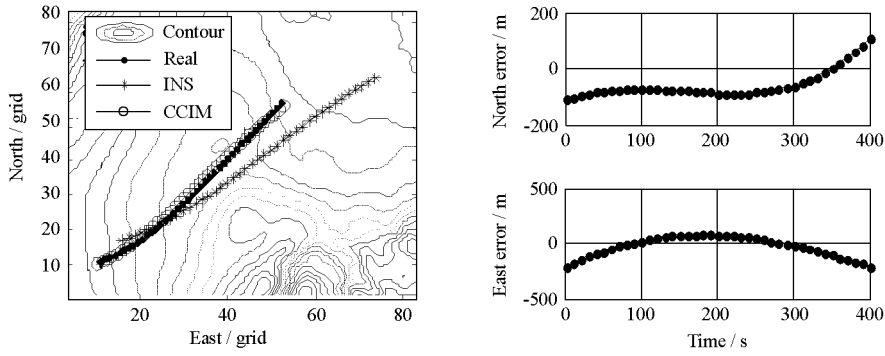


图 2 仿真 1 匹配轨迹和误差曲线

Fig. 2 Results of simulation 1

仿真 2: 初始位置误差 (1500, 2000) m, 初始速度误差 (8, 6) m/s, 初始航向误差  $0.01^\circ$ , 陀螺漂移  $5^\circ/\text{h}$ , 加表零偏  $100\mu\text{g}$ 。由于陀螺漂移比较大, 在粗精匹配后又进行了基于“最近邻”原则的补偿。补偿前后仿真结果如图 3 所示。表 1 给出了仿真结果的数据对比。

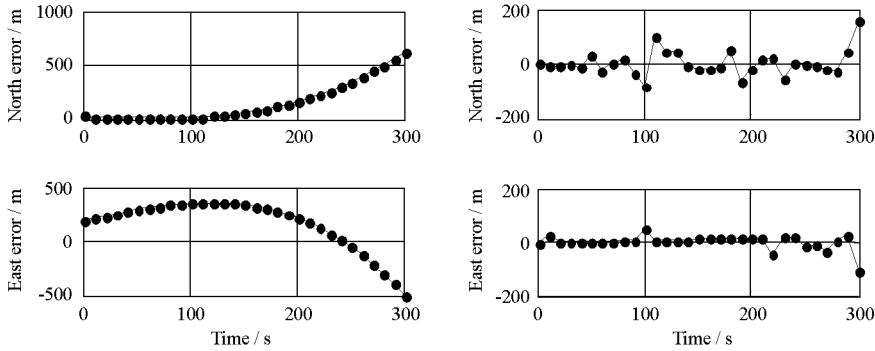


图 3 仿真 2 补偿前后的结果对比

Fig. 3 Results with and without compensation

表 1 仿真结果

Tab. 1 Simulation results

指标	仿真 1	仿真 2
是否补偿	否	是
平均定位精度	(70, 77) m	补偿前: (160, 267) m 补偿后: (31, 17) m
匹配时间(遍历时间)	21s(278s)	15s(131s)

由仿真结果和表 1 的数据可以看出, 基于等值线约束的组合匹配算法能有效估计惯导系统的位置误差。相对于遍历算法, 组合匹配法在兼顾了精度的条件下大大提高了算法的效率。在不同的运动模式和磁图上, 算法都得到了较好的性能, 验证了算法的适应性。

2008 年, 在中国北部某地区进行了车载验证试验, 地磁图网格间距 100m。陀螺漂移  $0.01^\circ/\text{h}$ , 加表零偏  $10^{-5}\text{g}$ , CZM-3 型质子磁力仪(测量精度  $\pm 1\text{nT}$ ), 实验时间 80min。地磁异常值由测量值直接减去磁场模型值获得。测量过程中没有进行日变校正, 把日变误差看作一个随机常值误差, 在匹配中通过去除均值法直接消除。由于现有惯导系统精度较高, 主要验证了长航时情况下匹配算法的性能。前 4km 进行无补偿匹配, 后 3km 是有补偿匹配。相比于 GPS 的位置基准, 平均匹配精度达到了 (20.7, 45.3) m, 匹配结果如图 4 所示。

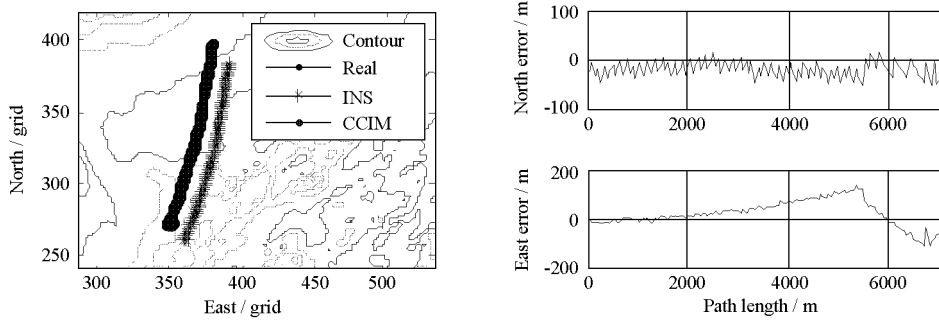


图4 跑车实验结果  
Fig.4 Results of real experiments

## 4 结论

文中首次对一维地磁匹配进行了系统的分析,并从特征空间、相似性度量、搜索空间、搜索策略四个方面为一维匹配建起了一个结构框架,为后期的方法研究奠定了基础。通过简化惯导解算过程,把地磁匹配归结为一个带补偿过程的仿射变换。模型建立过程中,考虑了匹配前和匹配中惯导系统的各种积累误差,提高了模型的适应性。基于匹配模型,提出了基于等值线约束的组合匹配算法。该算法从遍历算法演化而来,具有很好的全局搜索能力;同时,应用等值线约束和粗糙两级扫描策略大大减少了算法的计算量,同时兼顾了匹配的局部定位能力。仿真和实验结果证明,算法具有很好的匹配精度、匹配速度和适应性。

## 参考文献:

- [1] Goldenberg F. Geomagnetic Navigation Beyond Magnetic Compass[C]//PLANS, San Diego, California, 2006.
- [2] "Military Critical Technologies List," D. o. Defense, Ed., 2003.
- [3] 胡小平, 刘颖, 穆华, 等. 水下惯性/地磁组合导航技术[C]//国防科技前沿发展论坛, 长沙, 2006.
- [4] Tyrén C. Magnetic Anomalies as a Reference for Ground speed and Map matching Navigation[J]. Journal of Navigation, 1982, 35(2): 242-254.
- [5] Tyrén C. Magnetic Terrain Navigation[C]//Symposium on Unmanned Untethered Submersible Technology, Marine Systems Engineering Laboratory, University of New Hampshire, 1987: 245-256.
- [6] Liu Y, Wu M P, Hu X P, et al. Research on Geomagnetic Matching Method[C]// the 2<sup>nd</sup> IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications (ICIEA07), HaerBin, China, 2007.
- [7] Liu Y, Wu M P, Hu X P, et al. Geomagnetism Aided Inertial Navigation System[C]//the 2<sup>nd</sup> Symposium on Systems and Control in Aerospace and Astronaut (ISSCAA2008), Shenzhen, China, 2008.
- [8] 刘颖, 吴美平, 胡小平, 等. 基于等值线约束的地磁匹配方法[J]. 空间科学学报, 2007, 27(6): 505-511.
- [9] 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, 27(6): 17-21.
- [10] 李素敏, 张万清. 地磁场资源在匹配制导中的应用研究[J]. 制导与引信, 2004, 25(3): 19-21.
- [11] 彭富清. 地磁模型与地磁导航[J]. 海洋测绘, 2006, 26(2): 73-75.
- [12] Brown L G. A Survey of Image Registration Techniques[J]. ACM Computing Surveys, 1992, 24(4): 325-376.
- [13] McLean S, Macmillan S, Maus S, et al. The US/UK World Magnetic Model for 2005-2010[R]. NOAA Technical Report NESDIS/NGDC-1, 2004.
- [14] 康耀红. 数据融合理论与应用[M]. 第二版. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2006.
- [15] 赵锋伟, 李吉成, 沈振康. 景象匹配技术研究[J]. 系统工程与电子技术, 2002, 24(12): 110-113.
- [16] Titterton D H, Weston J L. Strapdown Inertial Navigation Technology [M]. 2nd Ed, AIAA, 2004.