

一种骨架提取的海洋重力适配区域局部分析方法

刘繁明¹ 姚剑奇¹ 李 艳¹

1 哈尔滨工程大学自动化学院, 黑龙江 哈尔滨, 150001

摘 要:针对重力匹配定位精度与适配区特性及载体的航向有关的特点,提出了一种先由移动窗口计算重力场局部特征并优选适配区的方法,并证实匹配定位精度受适配区特性及载体航向的影响。引入快速欧氏距离场算法和简化方法提取适配区简化骨架,并由简化骨架点及其距离值生成局部适配区域。通过统计局部适配区重力特征为航向选择提供依据。仿真结果证明了本文方法的有效性。

关键词:海洋重力匹配定位;局部适配区域;骨架提取;航向;重力特征

中图法分类号:P229.2;U666.1 **文献标志码:**A

目前海洋运载器多将惯性导航系统(INS)做为主要自主导航手段,但 INS 误差会随时间增大,需定期校正或重调。利用重力场特征进行匹配定位以校正 INS 位置误差,具有隐蔽性强、自主性强以及不受外界干扰等优点^[1]。但重力匹配定位适用于重力变化明显的区域^[2],因此需要分析重力场的可导航性。

文献[3-4]提出利用重力场统计参数及设定的阈值提取适配区域,文献[5]在其基础上提出应用凸壳进一步划分离散的适配区域,但对匹配精度受航向的影响分析较少;文献[6]借鉴图像分析方法,提出用共生矩阵对导航性进行分析的方法,侧重于航向对匹配精度的影响,没有与上述文献提出的导航区域提取相结合。本文分析了匹配精度与航向和局部重力场间的关系,提出了一种提取适配区域的简化骨架点,由其生成局部区域的方法。统计局部区域的特征参数以实现局部导航性分析,且为在不同区域进行重力匹配定位的航向选择提供依据。

1 重力场统计特征及适配区域提取

1.1 重力场统计特征分析

由于重力异常能更突出地表述重力场的变化,因此一般采用重力异常进行重力匹配,而重力异常图常以离散网格形式存储,类似 DEM 数据,所以可借鉴地形导航性分析方法来分析重力场的

导航性。可将重力场特征参数^[3-4,7]描述如下。

1) 重力场粗糙度

粗糙度 σ_z 反映重力场局部起伏程度,定义:

$$\sigma_z = (Q_x + Q_y) / 2 \tag{1}$$

$$Q_x^2 = \frac{1}{M(N-1)} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^{N-1} (g_{i,j} - g_{i,j+1})^2 \tag{2}$$

$$Q_y^2 = \frac{1}{(M-1)N} \sum_{i=1}^{M-1} \sum_{j=1}^N (g_{i,j} - g_{i+1,j})^2$$

式中, M, N 为重力场 X, Y 方向 $M \times N$ 的网格; $g_{i,j}$ 为各网格点重力值。

2) 重力场标准差

$$\sigma_T = \sqrt{\frac{1}{MN-1} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N (g_{i,j} - \bar{g})^2} \tag{3}$$

$$\bar{g} = \frac{1}{MN} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N g_{i,j}$$

式中, \bar{g} 为局部重力场均值,其余同式(3)。

标准差说明重力场的整体起伏程度,而粗糙度与之之比(丰度)可描述重力场起伏的丰富程度。

3) 重力场坡度与坡向

定义移动计算窗口,如图 1 所示,则坡度可定义为:

$$\begin{aligned} f_x &= (g_3 - g_1 + g_6 - g_4 + g_9 - g_7) / 6 \\ f_y &= (g_7 - g_1 + g_8 - g_2 + g_9 - g_3) / 6 \end{aligned} \tag{4}$$

g_1 至 g_9 为图 1 中对应编号网格点处的重力异常, f_x, f_y 分别为 X, Y 方向的重力坡度,而坡向为:

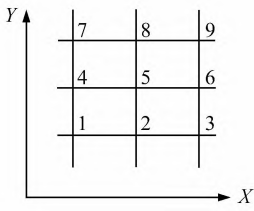


图 1 移动计算窗口

Fig. 1 Mobile Computing Window

$$A = 270^\circ + \arctan(f_y/f_x) - 90^\circ f_x/|f_x| \quad (5)$$

坡向表征该点重力变化最大的方向,即重力等值线梯度方向。此外定义坡向均值和标准差:

$$A_{\text{std}}^2 = \frac{1}{MN-1} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N (A(i,j) - \bar{A})^2 \quad (6)$$

$$\bar{A} = \frac{1}{MN} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N A(i,j)$$

式中, \bar{A} 表征该区域的平均坡向,即等值线变化最密集的方向; A_{std} 表征该区域内坡向的离散程度,标准差越大则该区域的坡向变化越大。

1.2 适配区域提取

重力匹配定位在重力特征变化明显的区域定位精度较高。而海洋重力场特征变化明显的区域往往是重力异常有较大起伏的区域,所以可选用重力异常粗糙度、标准差、丰度描述重力特征变化的剧烈程度。选取一定大小的计算窗口,便可得到每个离散网格的局部重力场统计参数。根据以往的区域导航性研究^[3-4],取 5×5 网格大小的计算窗口并取阈值 $T = [\sigma_T/\sigma_N > 5] \wedge [\sigma_Z/\sigma_T > 0.1] \wedge [\sigma_Z/\sigma_N > 1.5]$ 来选取导航性强的区域,其中, σ_N 是系统噪声标准差。此外,由于是为海洋运载器划定匹配导航区域,所以需要将陆地排除在外。

图 2(a)为某海域原始重力场,其纬度跨度为 6° ,经度跨度为 7.5° ,分辨率为 $1' \times 1'$ 。图 2(b)为由阈值 T 选定并去掉陆地后的适配区域。

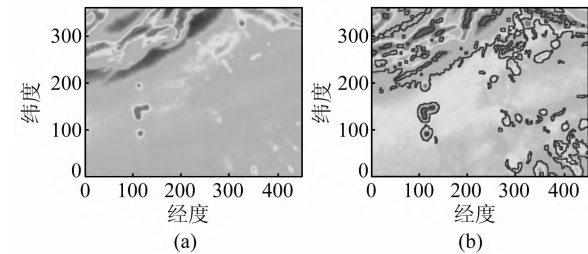


图 2 重力场及重力适配区域

Fig. 2 Gravity Field and Matching Area

2 适配区域的局部分析

局部适配区域的统计特征及航行方向会影响

重力匹配定位精度,所以仅划分导航性强的区域并不能说明不同局部区域的特征,需要局部化分析适配区域。

2.1 局部区域对重力匹配定位的影响

局部区域对重力匹配定位的影响分两方面:
①重力场粗糙度和标准差大的局部区域抗量测噪声能力强,定位精度高;反之,则定位精度低。
②区域重力等值线方向变化程度^[8-9]及航向会影响定位精度^[6],如图 3 所示。

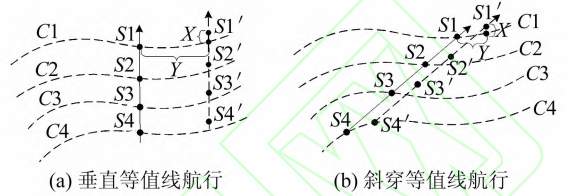


图 3 不同航向的重力匹配定位

Fig. 3 Gravity Matching and Location of Different Heading

以相关匹配进行定位,图 3 中带箭头的实线代表真实轨迹,虚线为最终匹配轨迹, $S1 \sim S4$ 为重力量测点,设总的量测误差为 M ,则最终各量测点匹配误差可归结为沿垂直等值线 $C1$ 方向的分量 X 和沿等值线 $C1$ 滑动的分量 Y ,且有式(7)成立:

$$M \approx \left(\sum_{i=1}^n k_{xi} \right) X + \left(\sum_{i=1}^n k_{yi} \right) Y, \quad X = n_1 \Delta x, Y = n_2 \Delta y \quad (7)$$

式中, k_{xi} 为 S_i 在垂直等值线 $C1$ 移动时重力数据变化率; k_{yi} 为 S_i 沿等值线 $C1$ 滑动时由于 C_i 与 $C1$ 不平行产生的重力数据变化率; Δx 和 Δy 为两个方向的移动步长; n 为匹配序列长度。

对垂直等值线航行的轨迹, $\sum k_{xi}$ 显然很大, X 较小;而重力场相关性使该方向一定距离内各量测点所处等值线较平行,则 $\sum k_{yi}$ 较小, Y 可能较大。对斜穿等值线轨迹, $\sum k_{xi}$ 仍然很大,而量测点间相关性减弱,所处等值线方向变化增大,则 $\sum k_{yi}$ 可能增大, Y 减小。而对于重力等值线变化大的区域, $\sum k_{yi}$ 及 $\sum k_{xi}$ 均较大,定位误差降低。

2.2 适配区域的骨架提取

由图 2(b)可知,适配区边界不规则,不同局部适配区域的范围不同,若有局部窗口沿适配区域滑动,窗口的大小依该处适配区域范围可调,则可对适配区进行局部分析,且因窗口的大小是依适配区域范围自动调节的,所以避免在窗口中引入大量非适配区域,影响局部分析结果,如图 4 所示。

图 4 中,滑动窗口中心在适配区域中轴上,即

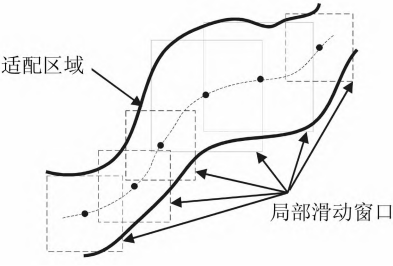


图 4 适配区域局部分析

Fig. 4 Local Analysis of the Matching Area

适配区域的几何中心线。窗口大小与其中心到区域边界最小欧氏距离相关,以保证窗口中绝大部分区域是适配区。基于以上考虑,需提取适配区域中轴,即骨架线^[10],并明确骨架点到区域边缘的最小距离。

常用的骨架提取方法有基于细化的方法和距离场方法。因为需要知道骨架点到区域边界的最小欧氏距离,所以采用欧氏距离场的骨架提取方法。

设重力场为 $m \times n$ 的离散网格,适配区域边界可由逻辑数组 b 表示, b 中为 1 的元素表示其对应的位置为边界,则适配区域的欧氏距离场为区域内每个网格点 (x, y) 到边界的最短欧氏距离 $dt[x, y] = \sqrt{EDT(x, y)}$,其中:

$$EDT(x, y) = \min((x - i)^2 + (y - j)^2); \quad (8)$$
$$i \in [0, m) \wedge j \in [0, n) \wedge b[i, j]$$

直接计算式(8)求解精确的欧氏距离场非常耗时。针对此已提出很多线性时间距离场计算方法,以棋盘距离或城镇距离近似欧氏距离计算来加快计算速度的方法较多,但这种方法会使精度降低。文献[11]提出线性时间的精确欧氏距离场计算方法,将 $EDT(x, y)$ 表示为:

$$EDT(x, y) = \min((x - i)^2 + G(i, y)^2); \quad (9)$$
$$i \in [0, m),$$
$$G(i, y) = \min(|y - j| : j \in [0, n) \wedge b[i, j])$$

式中, $G(i, y)$ 为目标点 (i, y) 距 i 行上目标边界点的最小欧氏距离,算出 $G(i, y)$ 后,可将 $EDT(x, y)$ 表示为:

$$F_i = (x - i)^2 + g(i)^2 \quad g(i) = G(i, y)$$
$$EDT(x, y) = \min(F_i; i \in [0, m)) \quad (10)$$

当 y 固定, x 变化时, F_i 为以 $(i, g(i)^2)$ 为顶点的抛物线, $EDT(x, y)$ 等价于求第 y 列网格对应的抛物线集合 $\{F_i | i \in [0, m)\}$ 的下包络。文献[11]给出了 $G(i, y)$ 和 $\{F_i | i \in [0, m)\}$ 下包络的线性时间计算方法,因篇幅原因,此处不再详述。由该方法计算得到的适配区域距离场如图 5(a)所示。

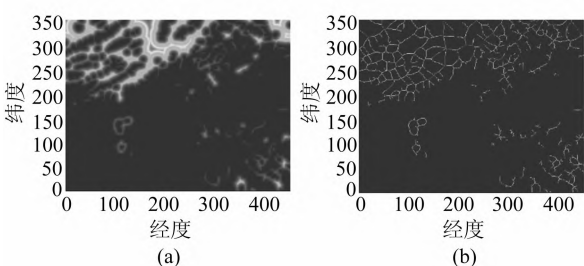


图 5 适配区域距离场及骨架线

Fig. 5 Distance Field and Skeleton of the Matching Area

目标的骨架线即为距离场脊线,而由于适配区域拓扑结构非常复杂,很难准确判断其脊点,而按照骨架点的最大圆(球)定义^[10],骨架点处的距离值应大于其邻域内大多数点的距离值,而并不完全是距离场的局部极大点,所以可记录目标点邻域内大于其距离值的其余目标点的个数,当小于一定阈值时,可取当前目标点为近似骨架点^[12]。而由该方法生成的骨架线并不连续,可基于距离场梯度^[13]思想设计骨架连接方法。设斜率函数为:

$$slp(n_i) = \begin{cases} dt(n_i) - dt(p), n_i \in N_D(p) \\ (dt(n_i) - dt(p)) / \sqrt{2}, n_i \in N_I(p) \end{cases} \quad (11)$$

式中, n_i 为 p 点的邻接点; $N_D(p)$ 表示与 p 的垂直和水平邻接点; $N_I(p)$ 表示 p 的对角线邻接点。则骨架连接操作可由基于队列的算法完成:①初始化队列,并将断裂的骨架点加入队列;②若队列非空,则从队列中取出断裂的骨架点,在其邻接点中选出 $slp(n_i)$ 最大的点,若其不为骨架点,则将其标记为骨架点并加入队列中;③循环执行步骤②,直至队列为空。

由该算法对骨架点进行连接,并执行细化操作^[10]以得到线形骨架线,最终得到的适配区域骨架线如图 5(b)所示。

2.3 骨架点的简化及适配区域的局部化分析

若以图 5(b)中的每个骨架点为中心形成局部窗口,窗口间会大量重叠,造成冗余,所以需要精简骨架点。文献[14]提出了一种简化骨架算法,但使用该方法得到的很多骨架点位置仍非常接近,圆盘区域大面积重叠,不适合作为目标局部分析窗口中心使用。借鉴该算法的思想,将简化骨架点的判断从目标边界的覆盖情况转移到目标面积的覆盖情况和骨架点窗口间的重叠程度,其最终目的是:选取一个骨架点集合,其形成的区域集合应尽量包含适配区域,减少引入非适配区域,且局部区域间的重叠面积不应过大,以免生成的局部区域过度繁杂。将局部区域定义为以骨架点

为中心,其最短欧氏距离值为边长形成的正方形区域,则简化算法可描述如下:

1) 设定局部区域重叠面积比例 γ ,当目标骨架点区域与其他区域重叠的面积小于比例 γ 时,取其为简化骨架点,按以上准则对所有骨架点进行判断。

2) 由步骤 1) 生成的局部区域集合会遗漏少数分片连续的适配区。统计这些区域面积,当大于阈值 K 时(本文取 K 为 15 个网格),取该区域中距离值最大的点为中心形成局部区域,以收集

遗漏的适配区域。

3) 对范围过大的局部区域,可按一定的行列间隔将其分解为多块小区域。

步骤 1) 中,由于新生成的局部区域会与已存在的局部区域部分重叠,最终区域间重叠比例将大于 γ ,因此可适当降低 γ 值,本文中设定 γ 值为 0.25。图 6 为由该算法得到的部分骨架点及其生成的局部区域与原适配区域的覆盖情况,其中方框及其中心点为形成的局部区域及骨架点,被方形区域内的曲线围成的区域是原适配区域。

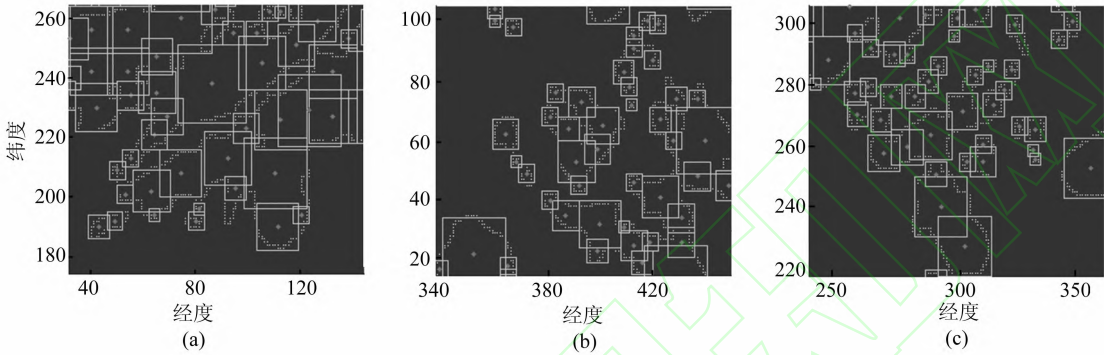


图 6 部分简化骨架点及局部区域
Fig. 6 Part of the Simplified Skeleton Points and Local Area

统计局部区域的重力场特征参数,经实验发现,有些区域的粗糙度尚可,但坡向标准差非常小(小于 10°),区域内重力等值线变化小不适用于匹配定位,需删掉这些区域。最终适配区域将由简化骨架点形成的局部区域集合表示,每个局部区域由对应骨架点的坐标、区域大小、区域内重力场标准差、粗糙度、丰度、坡向均值、坡向标准差等信息。最终骨架点及局部区域如图 7 所示。

定位试验,采用 MSD 算法进行匹配,INS 初始航向角误差 1° ,航行速度 10 节/h,初始速度误差 0.2 m/s,陀螺随机常值漂移和随机漂移都为 $0.01^\circ/\text{h}$,加速度随机漂移 10^{-5} g ,设重力仪采样周期为 3 min,其精度为 1 mGal,每次匹配记录 21 个数据。航向 H 在区间 $H1$ 、 $H2$ 、 $H3$ 中选择,如图 8 所示。

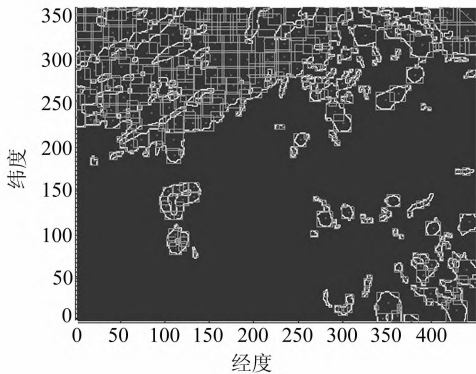


图 7 最终骨架点及其局部区域
Fig. 3 Final Skeleton Points and Their Local Area

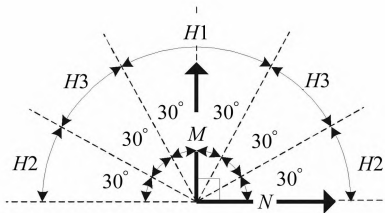


图 8 航向分区
Fig. 8 Partition of Heading

图 8 中, M 等于区域的 \bar{A} (平均坡向),所以 $H1$ 为接近垂直等值线的方向区间,而 $N=M-90^\circ$,所以 $H2$ 为接近平行等值线的方向区间, $H3$ 为斜穿等值线方向区间。在各局部区域中,各从 $H1$ 、 $H2$ 、 $H3$ 中随机选取 5 个航向,每个航向进行 100 次匹配实验,以误差超出 1 海里为误匹配,各区域的 $H1$ 、 $H2$ 、 $H3$ 匹配概率为该区间的有效匹配次数与总匹配次数之比,匹配精度为该航向区间的平均定位精度。

某区域单次匹配实验如图 9 所示。所有试验区域特征参数及其匹配定位试验结果如表 1 所示。

3 仿真分析

选取 15 个不同特征的局部区域进行重力匹配

表 1 局部区域特征参数及匹配定位实验结果

Tab. 1 Characteristic Parameters of the Local Area and Their Experimental Results

编号	σ_Z/σ_N	σ_T/σ_N	σ_Z/σ_T	$A_{std}/^\circ$	H1		H2		H3	
					匹配概率/%	匹配精度/grid	匹配概率/%	匹配精度/grid	匹配概率/%	匹配精度/grid
1	1.53	7.44	0.21	13.50	74.1	0.87	87.6	0.58	92.1	0.43
2	2.58	21.6	0.1	17.30	76.9	0.72	80.1	0.70	91.2	0.49
3	2.21	11.09	0.2	18.65	81	0.64	90.5	0.51	94.7	0.42
4	2.19	11.08	0.2	19.69	75	0.86	93.4	0.50	95	0.43
5	2.33	9.92	0.23	25.28	88.5	0.62	100	0.19	96	0.32
6	1.75	7.76	0.23	28.70	90.2	0.54	93.4	0.40	100	0.29
7	7.68	64.93	0.12	12.57	86.25	0.61	87.77	0.57	95.84	0.35
8	8.72	53	0.16	13.01	87.84	0.64	95.5	0.35	99.84	0.27
9	6.72	32.7	0.21	21.83	90.75	0.59	93.34	0.42	96.5	0.31
10	6.43	61.83	0.1	31.37	95.75	0.40	95.34	0.38	98.25	0.32
11	6.27	61.38	0.1	37.93	90.39	0.49	90.54	0.62	95.39	0.46
12	6.22	53.45	0.12	72.38	91.15	0.42	91.67	0.57	93.17	0.46
13	8.13	85.29	0.1	74.37	93.1	0.41	98	0.27	91.2	0.51
14	5.4	43.09	0.13	96.10	91.5	0.45	92.34	0.42	91.5	0.39
15	5.86	17.66	0.33	120.6	97.5	0.22	100	0.19	100	0.24

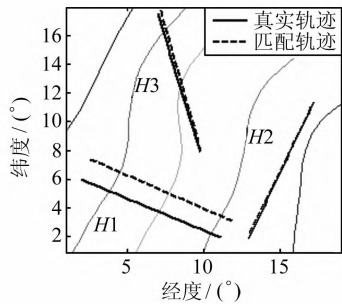


图 9 某局部适配区域的匹配定位示例

Fig. 9 A Matching Sample in Some Local Navigation Area

应用最小显著性差异法,在给定显著性水平 $\alpha=0.05$ 下进行显著性分析得:区域 1~11、15 的 H3 匹配概率与 H1 之间存在显著性差异,而区域 12~14 的 H3 与 H1 间无显著性差异(因篇幅原因,只给出分析结果而省略方差分析表),其中区域 1~11 的坡向变化较小,而区域 12~15 的坡向变化较大,而区域 1~11 的 H3 匹配概率高于 H1,所以所得结果基本符合 § 2.1 的论述;而 H2 的匹配概率与 H1 和 H3 之间的关系是不稳定的,有时甚至高于 H3,原因是沿 H2 航向匹配时,一定距离内等值线方向存在变化,某些区域其近似为 H3 方向,所以其匹配概率总体上高于 H1。从数值上观察,区域 1~4 的重力变化和坡向变化较弱,其 H3 匹配率与 H1 和 H2 差距较大;区域 5、6 的坡向变化有所提升,其 H1、H2 匹配概率与 H3 差距减小;区域 7、8 的重力变化程度增强,但是坡向变化较小,H1、H2 匹配概率相对区域 1~4 有所提升,但与 H3 仍存在差距;区域 9~11 的重力变化和坡向变化均增强,其 H1、H2 正确匹配率与 H3 差距减小;区域 12~15 的坡向变化

较大,这些区域等值线方向变化较大,其 H1、H2、H3 匹配概率相近。综上可知,除重力变化程度外,局部区域的坡向变化程度也会影响匹配正确率与精度。根据试验分析可得如下经验性准则:总体上 H3 匹配效果较好,而在坡向变化小的区域($50^\circ>A_{std}\geq 13^\circ$),H1、H2 匹配概率低于 H3,应在 H3 内选择航向;而坡向变化大的区域($A_{std}\geq 50^\circ$),H1、H2 与 H3 匹配概率接近。

文献[6]中的共生矩阵可判断导航的方向性优劣。用该方法对比分析,取对方向判别有效的信息熵(ENT)和相关性(COR)并选定 7 个区域进行实验,检测方向与文献[6]一致,只列出与 H1、H3 相近方向的实验数据,如表 2 中 d 为区域内重力数据量,即已经过圆整后不相等的重力数据个数。

表 2 各区域共生矩阵分析数据
Tab. 2 Analytical Data of GLCM in Each Area

编号	d	H3		H1	
		ENT	COR	ENT	COR
1	25	3.93	0.017 5	3.78	0.019 9
2	10	5.55	0.001 3	5.39	0.001 3
	6				
5	54	4.78	0.006 7	4.76	0.007 3
6	26	3.82	0.017 9	3.80	0.020 8
7	214	5.94	0.000 3	5.83	0.000 3
11	224	6.15	0.000 3	6.00	0.000 3
15	82	5.50	0.002 8	5.41	0.002 8

由表 2 可看出,H3 优于 H1,但其差别较小,且部分区域 COR 无差别。此外 ENT 与 COR 对区域重力数据量较敏感,重力数据量多,信息量大,熵必然增大,而由 COR 的表达式可知,其会随数据量增多而减小,而不能确定数据量多的区

域导航性优于数据量少的区域。而根据本文方法的实验结果,虽然采用的样本有限,不能在统计意义上验证区域的导航精度随粗糙度及坡向变化的同比关系,但可看出坡向变化及粗糙度小的区域 1~8 的匹配概率明显小于区域 9~15,所以本方法对区域间导航性比较具有一定的参考价值。

4 结 语

由局部重力特征选出重力适配区域,通过提取适配区域的简化骨架点形成局部区域,统计局部区域的特征参数达到局部分析的目的,通过仿真实验说明局部区域特征参数尤其是坡向变化程度与航向对重力匹配定位精度的影响,为局部区域匹配定位的航向选择提供依据。

参 考 文 献

- [1] Behzad K P, Behrooz K P, Vehicle Localization on Gravity Maps[C]. The SPIE Conference on Unmanned Ground Vehicle Technology, Orlando, USA, 1999
- [2] Yuan Shuming, Sun Feng, Liu Guangjun, et al. Application of Gravity Map Matching Technology in Underwater Navigation[J]. *Journal of Chinese Inertial Technology*, 2004, 12(2): 13-17(袁书明,孙枫,刘光军,等.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)
- [3] Cheng Li, Zhang Yajie, Cai Tijing. Selection Criterion for Matching Area in Gravity Aided Navigation[J]. *Journal of Chinese Inertial Technology*, 2007, 15(5): 559-563(程力,张雅杰,蔡体菁.重力辅助导航适配区域选择准则[J].中国惯性技术学报,2007,15(5):559-563)
- [4] Li Dehua, Yang Can, Hu Changchi. On the Selection Criterion for a Terrain Matching Field[J]. *J. Huazhong Univ. of Sci. & Tech*, 1996, 24(2): 7-8(李德华,杨灿,胡昌赤.地形匹配区选择准则研究[J].华中理工大学学报,1996,24(2):7-8)
- [5] Yan Li, Ma Xudong, Shi Juan. Extraction Method of Suitable Matching Regions in the Gravity-Aided Inertial Navigation[C]. The SPIE Conference: International Symposium on Spatial Analysis, Spatial-Temporal Data Modeling and Data Mining, USA, 2009
- [6] Zhao Jianhu, Wang Shengping, Wang Aixue. Study on the Selection of the Geomagnetic Adaptable Matching Area Based on the Geomagnetic Co-occurrence Matrix[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2011, 36(4): 446-449(赵建虎,王胜平,王爱学.基于地磁共生矩阵的水下地磁导航适配区选择[J].武汉大学学报·信息科学版,2011,36(4):446-449)
- [7] Tang Guoan, Li Fayuan, Liu Xuejun. Digital Elevation Model Tutorial[M]. 2nd Edition. Beijing: Science Press, 2005(汤国安,李发源,刘学军.数字高程模型教程[M].2版.北京:科学出版社,2005)
- [8] Chen Lihua, Wang Shicheng, Sun Yuan, et al. Matching of Multi-dimensional Feature Elements in Areas with Smooth Magnetic Fields[J]. *Journal of Chinese Inertial Technology*, 2011, 19(6): 720-724(陈励华,王仕成,孙渊,等.地磁缓变区域的多维特征量匹配方法[J].中国惯性技术学报,2011,19(6):720-724)
- [9] Guo Qing, Wei Ruixuan, Zhou Wei, et al. Multidimensional Geomagnetic Matching Fusion Algorithm Based on Projection Pursuit[J]. *Acta Armamentarii*, 2010, 31(2): 235-238(郭庆,魏瑞轩,周炜,等.基于投影寻踪的多维地磁匹配融合算法[J].兵工学报,2010,31(2):235-238)
- [10] Blum H. Biological Shape and Visual Science: Part I[J]. *Journal of Theoretical Biology*, 1973, 38: 205-287
- [11] Meijster A, Roerdink J B T M, Hesselink W H. A General Algorithm for Computing Distance Transforms in Linear Time[M]. Boston: Springer, 2000
- [12] Liu Juntao, Liu Wenyu, Wu Caihua, et al. A New Method of Extracting Objects's Curve-skeleton[J]. *Acta Automation Sinica*, 2008, 34(6): 617-622(刘俊涛,刘文予,吴彩华,等.一种提取物体线形骨架的新方法[J].自动化学报,2008,34(6):617-622)
- [13] Ge Y, Fitzpatrick J M. On the Generation of Skeletons from Discrete Euclidean Distancemaps [J]. *IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1996, 18(11): 1 055-1 066
- [14] Nilsson F, Danielsson P E. Finding the Minimal Set of Maximum Disks for Binary Objects[J]. *Graph. Models Image Proc*, 1997, 59(1): 55-60

Local Analysis Method on the Marine Gravity Matching Area Based on Skeleton Extraction

LIU Fanming¹ YAO Jianqi¹ LI Yan¹

1 College of Automation, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China

Abstract: Considering the accuracy of gravity matching is influenced by heading and gravity field, the statistical characteristics of the gravity field are calculated by a moving window to select a gravity matching area, and the correlation between the accuracy of gravity matching and carrier heading is confirmed. Then, the skeleton points of matching areas are extracted by a fast Euclidean distance field algorithm and a simplification algorithm to form local areas with their distance values, so by calculating the gravity statistical characteristics of these local areas, the carrier can select headings with high gravity matching accuracy. Finally the validity of this analysis method is verified with simulation results.

Key words: marine gravity matching; local area; skeleton; carrier heading; gravity statistical characteristics

First author: LIU Fanming, professor, PhD supervisor, specializes in underwater vehicle location, passive navigation and the detection of faint signal. E-mail: hrblfm407@hrbeu.edu.cn

Foundation support: The Pre-research Project of the General Armament Department "Twelfth Five-Year Plan", No. 5130301.

(上接第 389 页)

tional security, economic construction and social development, but also promotes the transformation of China's economic development with it great market value. In accordance with the requirement proposed in the Third Plenary Session of 18th Central Committee that "make the market play a decisive role in allocating resources", development of China's high-resolution earth observation system must take the road of commercial operation. Firstly, main problems of development of China's high resolution earth observation systems are analyzed briefly; Secondly, the necessity and feasibility of commercial operation of high-resolution earth observation satellite system is proposed; Specific suggestions about development of commercial high-resolution Earth observation system are presented finally.

Key words: high-resolution Earth observation system; commercial operation; satellite; remote sensing; market

First author: LI Deren, professor , PhD supervisor, Academician of the Chinese Academy of Sciences, Academician of the Chinese Academy of Engineering, Academician of the Euro-Asia International Academy of Science. He has concentrated on the research and education in Geospatial Information Science and technology represented by RS, GPS and GIS.

Corresponding author: SHEN Xin, PhD. E-mail: only2shen@gmail.com

Foundation support: Consulting Project from China Institute of Development Strategy for Aerospace Engineering and Technology.