

侧扫声呐图像 SFS 微地形反演数值算法选择

王爱学^{1,2} 尚晓东¹ 张红梅³

¹ 武汉大学测绘学院,湖北 武汉,430079

² 精密工程与工业测量国家测绘地理信息局重点实验室,湖北 武汉,430079

³ 武汉大学动力与机械学院,湖北 武汉,430079

Optimization of SFS Numerical Algorithm for Obtaining Micro-Topography from Side Scan Sonar Image

WANG Aixue^{1,2} SHANG Xiaodong¹ ZHANG Hongmei³

¹ School of Geodesy and Geomatics, Wuhan University, Wuhan 430079, China

² Key Laboratory of Precise Engineering and Industry Surveying, National Administration of Surveying, Mapping and Geoinformation, Wuhan 430079, China

³ School of Power and Mechanical Engineering, Wuhan University, Wuhan 430079, China

摘 要:侧扫声呐成像环境复杂,噪声突出,图像明暗强度与海床底质和地形相关,采用 SFS 方法开展 2D 侧扫声呐图像的 3D 微地形恢复工作,需解决海床声波反射模型和 SFS 数值算法优选两个问题。结合侧扫声呐成像机理和声能方程,构建了漫反射回波提取模型;在此基础上,采用相关性、信噪比、信息熵等参数构建了 SFS 数值算法反演性能的评价体系;最后采用实测声呐图像开展了 4 种典型 SFS 数值算法的微地形反演试验。试验结果表明,相较于其他数值算法,Zheng & Chellappa 最小化算法不仅能有效地挖掘二维图像中的三维信息,而且具备较好的抗噪能力,更适合于侧扫声呐图像的三维微地形反演。

关键词:声呐图像;反演;微地形;Zheng&Chellappa 法

中图法分类号:P225.1

文献标志码:A

Abstract: Side-scan sonar image is a high-noise image because of complex marine environment, its gray intensity is closely related to sediment type and seabed topography, and 3D micro-topography recovery from sonar 2D gray image by SFS(shape from shading) method needs to solve two problems. One is constructing the seabed acoustic reflection model, another is optimization selection for SFS algorithm. In this paper, a diffuse echo extraction model is constructed with the combination of side-scan sonar imaging mechanism and sound energy equation, then an evaluation system composed of criterion about correlation, signal-to-noise ratio and comentropy is given to evaluate the inversion performance of different SFS numeric algorithm. In the end, four classic SFS numeric algorithms are carried out through 3D topogra-

phy recovery from actual side-scan sonar image. Experimental results show that the Zheng&Chellappa minimization method is the best one, which has not only anti-noise characteristics, but also can obtain more topography features implied in the sonar image.

Key words: sonar image; inversion; micro-topography; Zheng&Chellappa algorithm

侧扫声呐系统作为经济、实用的水下调查设备,可快速获取大区域海床高分辨率地貌图像,即使在深水区,采用深拖办法贴近海底,测量结果仍可达到厘米级的横向分辨率。但受其测量机理的制约,侧扫声呐系统并不能获得直观的海底地形信息^[1]。然而声呐图像的水柱宽度表征了拖鱼至海底的高度,阴影长度表征了凸起或凹陷目标的高度,另外,除去底质影响,声波的回波强度与海底地形之间也存在明显依赖关系,因此,侧扫声呐图像中包含了大量地形信息。若能挖掘这些地形信息,将进一步拓展侧扫声呐图像的应用潜力,为高分辨率海床地形信息的获取方法提供一种新途径。

国内外学者针对侧扫声呐数据处理开展了大量研究,为侧扫声呐图像三维地形挖掘提供了条件。目前,基于侧扫声呐图像的微地形恢复的研究大致分为两类:一类是基于侧扫声呐成像机理,借助阴影长度的目标形状重建^[2-5];另一类是根据计算机视觉原理,借助 SFS(shape from shading)技术,实现海床形状恢复。借助阴影长度可较好恢复阴影前端的

高度,但对阴影以外位置处的高度恢复,并无严密依据,因此,不适合于大区域地貌图像的三维地形反演;利用声呐图像明暗变化恢复床表地形(SFS法),需解决成像反射模型和求解数值算法选择问题,对同一成像反射模型^[6-8]采用不同的求解数值算法^[9],反演结果存在较大差异。

侧扫声呐图像受成像机理及复杂海洋环境的影响,目标轮廓模糊、噪声显著,并非所有的SFS数值算法都适用于侧扫声呐图像的地形反演,选择抗噪性强又可深度真实挖掘图像中地形信息的数值算法是侧扫声呐微地形恢复研究中的一项基础性工作。本文预开展针对侧扫声呐图像的典型SFS反演数值评价及选择研究。首先,根据侧扫声呐的成图机理,构建了侧扫声呐漫反射回波提取模型;然后,介绍了4种典型SFS反演数值算法,进而根据需要构建了反演地形的评价体系;在此基础上,通过试验分析找出最适合于侧扫声呐图像微地形恢复的SFS数值。

1 侧扫声呐漫反射回波提取模型

若海底表面为理想的漫反射体,根据朗伯体法则,当入射强度 I_0 和入射方向 n_i 一定时,能量经朗伯体表面反射,反射强度仅与入射方向和物体表面法线夹角的余弦有关,任意位置 (x, y) 处的反射强度 $I(x, y)$ 满足:

$$I(x, y) = I_0 \cos \theta = I_0 \cos(\angle(n, n_s)) \quad (1)$$

若令 (n_x, n_y, n_z) 或 (p, q) 描述物体表面 $z = f(x, y)$ 的法向量 (n_{sx}, n_{sy}, n_{sz}) 或高度梯度向量 (p_s, q_s) ,则式(1)可表示为:

$$I(x, y) = I_0 \frac{n \cdot n_s}{\|n\| \|n_s\|} = I_0 \frac{n_x n_{sx} + n_y n_{sy} + n_z n_{sz}}{\sqrt{n_x^2 + n_y^2 + n_z^2} \sqrt{n_{sx}^2 + n_{sy}^2 + n_{sz}^2}} \quad (2)$$

$$I(x, y) = R(p(x, y), q(x, y)) = I_0 \frac{pp_s + qq_s + 1}{\sqrt{p^2 + q^2 + 1} \sqrt{p_s^2 + q_s^2 + 1}} \quad (3)$$

上述两式即为朗伯体表面下图像的辐照度方程,以此为基础,SFS方法通过添加亮度、矢量、光滑性、可积性等约束条件,借助泛函分析方法实现最佳反演地形的求解。从上述反演机理可知,反向散射强度中的漫反射部分是唯一仅与海底地形相关的变量,基于侧扫声呐接收强度提取漫反射纯量强度是使用声呐图像明暗变化进行海底地形反演的基础。海底对声波的反射实际上是海底表面对投射至其上的声能量在空间中重新分配的过程。

除了声呐正下方小区域外,水听器所接收到的

回波都属于海底表面的散射回波。因此,声呐接收到的回波常被称为反向散射回波,其强度被称为反向散射强度。海底反向散射强度的大小是由海底底质、海底表面粗糙程度、地形等因素综合影响的结果。相关研究也表明^[1,10,11],当波束入射角 θ (波束方向与海底表面法线夹角)在 0° 附近时,海底反向散射强度 B 仅与海底底质特性有关,其大小可以近似为一常数 B_N ,为:

$$B = B_N (\theta \approx 0^\circ) \quad (4)$$

当入射角 $0^\circ < \theta < \theta_{\text{critical}}$ 时,海底反向散射强度 B 与入射角 θ 近似线性变化,为:

$$B = B_0 + (B_N - B_0) \cdot (\theta_{\text{critical}} - \theta) / \theta_{\text{critical}} \quad (0^\circ < \theta < \theta_{\text{critical}}) \quad (5)$$

式中,入射角 θ 是波束方向与海底表面法线夹角; θ_{critical} 是指反向散射强度 B 随入射角 θ 服从线性变化到服从Lambert法则的临界角,针对常见的海底底质类型, θ_{critical} 值主要分布在 $5^\circ \sim 30^\circ$ 之间; B_N 及 B_0 都是仅与海底底质反射特性有关的反向散射强度。

当入射角 $\theta \geq \theta_{\text{critical}}$ 时, B 不仅与波束入射角有关,还依赖于海底表面的粗糙程度及斜射时底质的反射特性 B_0 ,此时,粗糙的海底表面的 B 与入射角 θ 的相关性可以用Lambert法则描述^[12,13]为:

$$B = B_0 + 10 \log \cos^k \theta \quad (6)$$

式中, $k=1$ 或 2 。

仅当 $\theta \geq \theta_{\text{critical}}$ 时,海底表面才具有明显的漫反射特性,若 B_T 代表海底表面纯漫反射量,则式(6)可以写为:

$$B = B_0 + B_T \quad (7)$$

根据声能方程^[11]得海床面纯漫射量为:

$$B_T = E_{\text{均衡}} - S - B_0 = E + 30 \log R + \alpha R - 10 \log A - S - B_0 \quad (8)$$

式中, S 为发射能级; E 为接收强度; $30 \log R$ 、 αR 、 $10 \log A$ 分别对应图像均衡中所做的扩展损失、吸收损失、面积混响改正; $E_{\text{均衡}}$ 为接收强度经过均衡化后的强度。若知道海底底质类型及分布情况,便可从式(8)得到海底表面对入射声波的纯漫反射部分。

2 典型SFS反演数值算法

SFS方法根据物体表面实际情况选择不同的约束条件,然后按照不同的数值算法求解辐照度方程,最终实现物体表面的三维重构,Zhang^[9]、Durou^[14]、Prados^[15]、Lee^[16]等将SFS数值算法大致分为最小化法、演化法、局部分析法以及线性化法4类。

1) 最小化法。将SFS问题中的图像辐照度方程和光滑表面模型均表示成能量函数形式,然后将它们联立并转化为泛函极值问题或最优控制问题,

Zheng & Chellappa^[9] 采用亮度梯度约束取代光滑性约束条件, 并采用变分法将辐照度方程化为等价欧拉方程, 通过一阶泰勒级数展开实现高度函数和表面梯度及各阶导数的离散化, 进而得到一个线性收敛迭代格式, 最后应用多网格法快速实现最佳反演地形的求解。

2) 演化法。从图像中一组已知方向或高度的参考点或奇异点出发, 并通过 (p, q) 实现点与点之间的高度信息传递, 逐步确定出整个物体表面的形状信息。为了使反演结果具有唯一解, Bichsel & Pentland 采用最小下山原则来确定演化路径, 对任意点寻找每个方向上的最速上升或下降斜率。

3) 局部分析法。以给定的局部区域形状作为约束条件, 如平面、球面、柱面及鞍面等, 并与朗伯体反射模型构成关于物体局部形状参数的线性偏微分方程组, 以此求解物体的局部三维表面形状。Pentland 采用球面作为约束模型, 在物体表面寻找脐点, 并认为脐点周围局部区域服从某一曲率半径的球面函数, 对该函数求偏导, 并代入辐照度方程, 可

$$\text{Corr} = \frac{(\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N [I_0(i, j) - \bar{I}_0(i, j)][I_D(i, j) - \bar{I}_D(i, j)])}{\sqrt{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N [I_0(i, j) - \bar{I}_0(i, j)]^2 \times \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N [I_D(i, j) - \bar{I}_D(i, j)]^2}} \quad (9)$$

式中, $\bar{I}_D(i, j)$ 为 DOM 影像的平均灰度值; $\bar{I}_0(i, j)$ 为声呐图像的平均灰度值。相关系数太小, 表明反演地形失真严重, 但相关系数也并非越大越好, 由于侧扫声呐图像 **高斯噪声突出**, SFS 算法过分依赖图

$$\text{SNR} = \frac{\frac{1}{M \times N} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N [I_0(i, j) - \bar{I}_0(i, j)]^2}{\text{mean}\left\{D(m, n) \mid \frac{1}{9} \sum_{i=m-1}^{m+1} \sum_{j=n-1}^{n+1} [I_0(i, j) - \bar{I}_0(i, j)]^2, m < M, n < N\right\}} \quad (10)$$

由于海底地表变化平缓, 可以先计算图像各像素的局部标准差, 其平均值即为噪声的标准差。

3) 信息熵。DOM 影像的信息熵可用来反映反演地形所包含的平均信息量的大小。其表达式为:

$$E = - \sum_{l=0}^L p(l) \log_2 p(l) \quad (11)$$

式中, $p(l)$ 为某灰度值 l 在图像中出现的概率; L 为灰度等级。上述指标表征了 SFS 算法从图像中挖掘三维信息的能力以及对图像噪声的敏感程度。

4 试验及分析

为选择适合于侧扫声呐图像地形反演的最优 SFS 数值算法, 在深圳南部某水域开展试验。一实测侧扫声呐图像的部分左舷图像如图 1(a) 所示。其发射频率为 120 kHz, 拖鱼高度约为 45 m, 波束角范围从右到左为 $25^\circ \sim 77^\circ$, 图像分辨率为 $300 \times$

以求得起点局部表面曲率半径偏角及倾角。

4) 线性化法。将辐照度方程按泰勒级数展开, 并认为低阶项在反射过程中起主要作用。Tsai & Shah 首先利用有限差分方法将辐照度方程在各网格点 (i, j) 处离散化, 并按泰勒级数展开, 然后按雅克比迭代法构建格网点高度迭代式, 通过选择合适的收敛阈值, 最终实现格网点高度值的求解。

3 SFS 数值算法的相关评价指标

为评价上述 SFS 数值算法在侧扫声呐微地形反演中的效果, 可以将反演地形重新进行正射投影, 从而生成数字正射影像图 (**digital orthophoto map, DOM**), 原始声呐图像作为三维信息的唯一来源, 反演地形的 DOM 影像必定与原始图像存在很大的相关性, 除了相关系数, 图像的信噪比、信息熵等参数也可以表征 SFS 算法的相关性能。

1) 相关系数。可用来衡量 DOM 影像与声呐图像之间的相似程度, 表征了反演算法从二维图像中挖掘地形信息的程度。图像的相关系数表达式为:

像灰度值, 往往导致反演地形粗糙不连续。

2) 信噪比。SFS 算法对图像噪声的敏感程度可以用 DOM 图像的信噪比来衡量, 即图像整体灰度的标准差与噪声标准差的比值, 表达式为:

300, 像素实际尺寸约为 0.6 m。该区域海底表面构成以中沙为主, 并有少量裸露碎石, 碎石在图像上表现为强回波, 而海底表面地形平缓变化, 同底质的沙地也存在低对比度的明暗变化, 碎石对声波的反射损失为 $-3 \sim -6$ dB, 中沙的反射损失为 $-8 \sim -12$ dB。若要进行海底地形反演, 需要按式(8)对上述图像进一步改正, 消除底质因素影响, 得到仅与漫反射相关的海底表面回波图像。图 1(a) 中虚线对应 1 Ping 回波, 该 Ping 回波在海底反射强度改正前后的强度曲线如图 2 所示。整个图像经海底反射强度改正后的效果如图 1(b) 所示, 该图像基本上消除了底质的差异性, 其对比度减小, 但仍有明显的明暗变化。

经过上述处理后得到的声呐图像, 其明暗变化主要由地形的漫反射引起。对其进行 SFS 地形反演, 便可得到更加真实的海底地形特征。分别采用

Zheng&Chellappa、Bichsel&Pentland、Pentland、Tsai&Shah 共 4 种代表性 SFS 数值算法对图 1(b) 的侧扫声呐漫反射图像分别进行地形恢复试验,各数值算法的反演地形如图 3 所示。

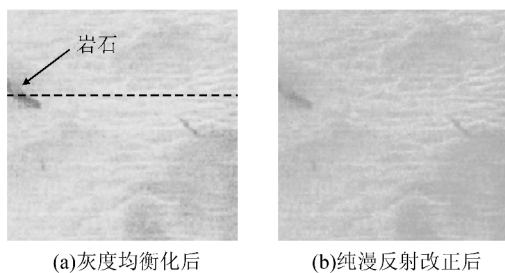


图 1 灰度均衡化后和纯漫反射改正后的声呐图像
Fig. 1 Sonar Images by Gray Equalization and After Correction of Pure Diffuse Reflection

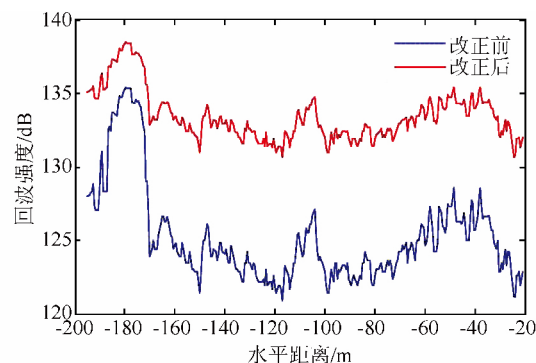


图 2 海底反射强度改正前后
单 Ping 回波强度曲线

Fig. 2 Intensity Curves of Single Ping Before and After Correction

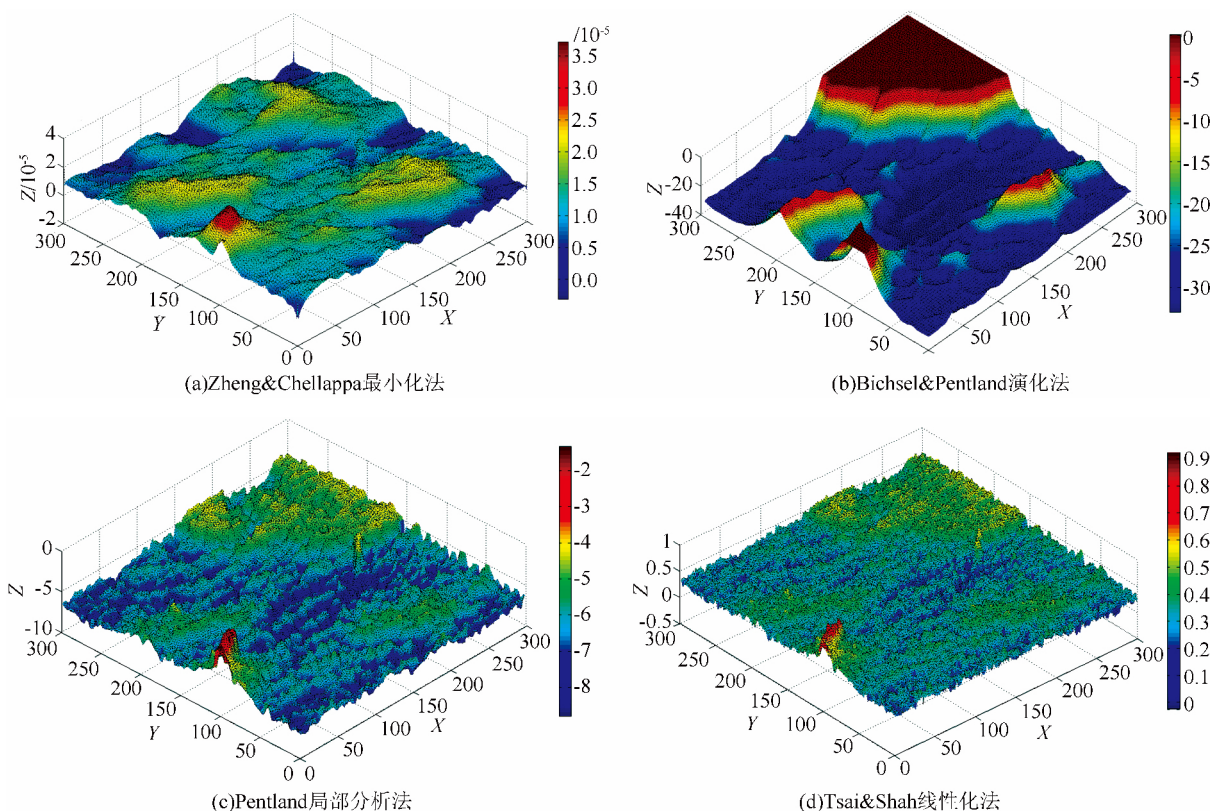


图 3 各数值算法的反演效果

Fig. 3 Inversion Effect of Different Numerical Algorithms

单从反演地形的三维效果来看,Zheng&Chellappa 的最小化法采用了亮度梯度约束,有效地保证了相邻区域间地形的光滑过渡,从图 3(a)可以看出,反演地形高低起伏过渡自然,视觉效果较好;Bichsel & Pentland 的演化法需寻找最小下山路径,当局部对比度较小时,演化路径难以进入该区域,导致反演地形局部失真,如图 3(b)所示;Pentland 局部分析法反演地形整体上表现出地形的起伏变化,但受局部约束函数影响,存在众多隆起,局部区域过渡不连续,如图 3(c)所示;Tsai&Shah 的线性化方法外源

约束条件较少,如图 3(d)所示,反演结果过分依赖于图像灰度,当图像噪声突出时,反演地形粗糙。

4 种反演算法得到了不同尺度下的相对地形,本文没有刻意将其归化至统一的尺度下。为了定量地评价各反演算法的性能,分别统计 4 种算法的 CPU 时间及反演地形 DOM 影像的相关性、信噪比和信息熵等参数,如表 1 所示。

从表 1 中可以看出:① Tsai&Shah 法的运算效率最高,耗时 0.467 s,Pentland 方法其次,剩下两种方法效率适中;② 对于 DOM 与原图像的相关系数,

Tsai&Shah 法和 Pentland 法都高达 0.9 以上,二者的反演地形几乎包含原始声呐图像的所有特征;③在反演地形的信噪比项上,Bichsel&Pentland 方法最高,为 23.213,其次是 Zheng&Chellappa,这两种算法对图像噪声的敏感程度较低,其他两种算法信噪比与原始图像信噪比相当;④在信息熵上,Zheng&Chellappa 法同样高于其他 3 种方法,为 4.839,说明该方法反演的地形具备更多的平均信息量。

表 1 各 SFS 数值算法反演效果评价指标表

Tab.1 Evaluation Index for Different Recover

Numerical Algorithms

反演方法	相关系数	信噪比	信息熵	时间/s
原声呐图像	-	3.012	3.386	-
Zheng&Chellappa	0.686	12.592	4.839	6.829
Bichsel&Pentland	0.106	23.213	4.569	7.272
Pentland	0.969	4.234	3.965	3.976
Tsai&Shah	0.999	3.009	3.947	0.467

综合上述各指标,并结合实际的反演效果图像,本文认为 Zheng&Chellappa 最小化算法相较于其他 3 种方法,更适合用于侧扫声呐图像的明暗地形恢复。

5 结束语

本文通过实测声呐数据开展 2D 声呐图像的 3D 微地形反演试验,试验结果表明,相较于其他数值算法,Zheng&Chellappa 最小化算法不仅能有效地挖掘二维图像中的三维信息,而且具备较好的抗噪能力,因此更适合于侧扫声呐图像的三维微地形反演。

由于本文试验未附加任何外部绝对地形约束信息,各数值算法按默认尺度参数进行计算,各自的反演结果并没有统一的数值范围和单位,如 Zheng&Chellappa 法的纵轴变化范围为 $-2 \times 10^{-5} \sim 4 \times 10^{-5}$,而 Bichsel&Pentland 法的为 $-40 \sim 0$,这是由 SFS 辐照度方程决定的,在缺少实际水深数据约束条件时,SFS 方法仅能根据图像明暗变化得到对应空间上的相对形状或高度变化,因此,后续仍需进一步开展侧扫声呐图像的 SFS 约束反演方法。

参考文献

- [1] 赵建虎,刘经南.多波束测深及图像数据处理[M].武汉:武汉大学出版社,2008
- [2] Cuschieri J M, Hebert M. Three-Dimensional Map Generation from Side-Scan Sonar Images[J]. Journal of Energy Resources Technology, 1990, 112(2): 96-102
- [3] 杨广.基于二维侧扫声呐图像的水下目标三维形状恢复方法研究[D].武汉:武汉大学,2012

- [4] Bell J M, Dura E, Reed S, et al. Extraction and Classification of Objects from Sidescan Sonar[C]. IEE Workshop on Non-Linear and Non-Gaussian Signal Processing, Peebles, UK, 2002
- [5] Reed S, Petillot Y, Bell J M. Automated Approach to Classification of Mine-Like Objects in Sidescan Sonar Using Highlight and Shadow Information[J]. IEE Proceedings—Radar, Sonar and Navigation, 2004, 151(1): 48-56
- [6] Horn B K P, Brooks M J. The Variational Approach to Shape from Shading[J]. Computer Vision Graphics and Image Processing, 1985, 33(2): 174-208
- [7] Ragheb H, Hancock E R. Surface Radiance Correction for Shape from Shading[J]. Pattern Recognition, 2005, 38(10): 1574-1595
- [8] Ahmed A, Farag A. Shape from Shading for Hybrid Surfaces[C]. IEEE International Conference on Image Processing, San Antonio, America, 2007
- [9] Zhang R, Tsai P S, Cryer J E, et al. Shape-from-Shading: A Survey[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1999, 21(8): 690-706
- [10] Jackson D R, Winebrenner D P, Ishimaru A. Application of the Composite Roughness Model to High-Frequency Bottom Backscattering[J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 1986, 79(5): 1410-1422
- [11] 刘伯胜,雷家煜.水声学原理[M].哈尔滨:哈尔滨工程大学出版社,1993
- [12] Simrad. Operator Manual of Kongsberg Simrad EM950 Multibeam Echo Sounder[M]. Norway: Kongsberg Simrad Company, 1997
- [13] Lurton X, Dugelay S, Augustin J M. Analysis of Multibeam Echo-Sounder Signals from the Deep Sea Floor[C]. Oceans Engineering for Today's Technology and Tomorrow's Preservation, Brest, France, 1994
- [14] Durou J D, Falcone M, Sagona M. Numerical Methods for Shape-from-Shading: A New Survey with Benchmarks[J]. Computer Vision and Image Understanding, 2008, 109(1): 22-43
- [15] Prados E. Application of the Theory of the Viscosity Solutions to the Shape from Shading Problem[D]. Nice: Nice Sophia Antipolis University, 2004
- [16] Lee K M, Kuo C C. Shape from Shading with a Linear Triangular Element Surface Model[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1993, 15(8): 815-822

收稿日期:2016-11-29

第一作者简介:王爱学,博士,主要从事海洋测绘研究。

E-mail:axwang@sigg.whu.edu.cn