基于多尺度几何拓扑与泊松融合的水陆实景三维数据无缝融合方法

徐　硕[1]，熊金宝[2]，沈　思[1]，舒紫默[1]，乔灵娜[3]

（1. 长江航道测量（武汉）中心，湖北 武汉 430010；2. 长江航道局，湖北 武汉 430000；
3. 武汉大势智慧科技有限公司，湖北 武汉 430200）

摘要：针对陆域实景三维模型与水下地形点云因尺度、纹理差异及几何拓扑不连续导致融合时交界区易产生几何缝隙与接缝色彩失真等问题，开展了水陆一体化实景三维数据融合技术研究，采用一种融合多尺度几何无缝处理与面基元泊松匀色的方法，通过边界检测与自适应网格化技术，消除水陆接边区域的几何裂隙，降低色差突变。在示范应用验证中，解决了接边区域的几何不完备问题，在保持源影像梯度结构特征的同时实现接缝区颜色分布的连续优化与平滑，构建了几何连续、纹理协调自然过渡的水陆一体化实景三维模型。研究表明，该融合策略可用于复杂航道环境下多源水陆实景三维数据的高质量融合，为实景三维中国在智慧航道的精细化建设与应用提供可靠的技术支撑。

关键词：水陆一体化；实景三维；智慧航道；多尺度几何融合；面基元泊松融合

中图分类号：U611　　**文献标志码：**A　　**文章编号：**1002-4972(2026)07-0166-07

The seamless fusion method of land and water real-world 3D data based on multi-scale geometric topology and Poisson fusion

XU Shuo[1], XIONG Jinbao[2], SHEN Si[1], SHU Zimo[1], QIAO Lingna[3]

(1. Changjiang Waterway Surveying Center, Wuhan 430010, China; 2. Changjiang Waterway Bureau, Wuhan 430000, China;
3. Wuhan Daspatial Technology Co., Ltd., Wuhan 430200, China)

Abstract: To address the problems of geometric gaps and seam color distortion that commonly occur in the transition zones during the integration of terrestrial realistic 3D models and underwater terrain point clouds due to scale inconsistency, texture differences, and geometric topological discontinuities, a water-land integrated realistic 3D data fusion technique is investigated. A method combining multi-scale geometric seamless processing and face-primitive-based Poisson color blending is adopted. Through boundary detection and adaptive meshing, geometric cracks in the water-land junction areas are eliminated, and abrupt color differences are reduced. In demonstration applications, the proposed method effectively resolves geometric incompleteness in the junction regions and achieves continuous and smooth color optimization across seams while preserving the gradient structural characteristics of the source imagery, resulting in a geometrically continuous and visually coherent water-land integrated realistic 3D model. The results demonstrate that the fusion strategy is suitable for high-quality integration of multi-source water-land realistic 3D data in complex navigation waterway environments, and can provide reliable technical support for the refined construction and application of the realistic 3D China initiative in the field of smart waterway.

Keywords: water-land integration; realistic 3D; smart waterway; multi-scale geometric fusion; face-primitive-based Poisson fusion

收稿日期：2025-11-24　　**录用日期：**2026-01-04

作者简介：徐硕(1984—)，女，硕士，高级工程师，研究方向为长江航道测绘与信息、电子航道图。

水运工程

随着“实景三维中国”和智慧航道建设的不断推进，构建水陆一体化的航道数字基底已成为实现航道设施管理、通航安全保障与生态环境监测等智能化应用的重要前提[1-2]。从早期依赖“船基叠加”技术的发展，到如今“空-岸-水-底”协同采集[3]，三维激光扫描和多波束测量等技术的应用，为建立完整的水上、水下三维模型提供可靠数据源[4]，水陆数字模型的数据获取在精度与完整性方面取得了显著进展[5]。同时在多源数据集成构建高精度的陆域和水体数字模型方面，也受广泛关注，如：Lubczonek 等[6]提出了一种结合无人机（unmanned aerial vehicle，UAV）和无人水面艇（unmanned surface vehicle，USV）数据的方法，用于构建包括陆地和水体部分的浅水体底部数字模型，且生成精度为 3 cm；王建雄等[7]通过融合无人机摄影测量获取的空三加密点云与机载 LIDAR 点云，成功构建了滩涂地形特征的三维模型；王进科[8]融合陆地激光雷达、无人机倾斜摄影、多波束测深与水下光学三维建模技术，提出浅海岸水陆一体化建模方法，构建海岸“空-水-底”一体化三维模型。其他学者采用 ALB-MBES 联合集成技术以及近年来的多平台地形点云融合方法，通过机载/车载 LiDAR、MBES 以及高分遥感等多源传感器的联合平差与配准方法，生成多尺度约束、误差建模与插值策略构建水陆一体化地形模型[9]。

然而，由于陆域倾斜摄影与水域多波束测深技术在数据采集机理、时空基准、空间分辨率等方面存在显著差异，交界区域常出现数据空洞、几何不连续及纹理色彩跳跃等问题，直接叠加会导致明显的几何缝隙和纹理“硬接边”，从而破坏水陆实景三维场景的空间连续性[10]。针对模型几何空隙修复及纹理过渡方面，已有相关研究成果。几何修复层面，基于 Laplacian 的网格编辑与平滑方法在编辑三维曲面时保持几何细节不被破坏，使得几何连续性优化不再以牺牲真实地形特征为代价[11-12]，另外，Sorkine 等也建议几何建模应当与其他曲面属性编辑（如纹理）的建模相结合，离散泊松方程已被证明在图像编辑中十分有效。纹理处理方面，泊松方程及并行纹理重建等多种方法[13]已应用成熟，保证三维模型的纹理映射精度和视觉一致性，其中基于泊松方程的无缝图像编辑方法，能有效消除拼接边界处的亮度和颜色不连续问题，广泛应用于图像无缝拼接、目标拷贝、修复与纹理融合等场景[14]。综上，构建高逼真度与高一致性的水陆一体化三维场景，需要在几何拓扑、网格划分优化、纹理融合等环节，通过智能化、结构化的数据融合方法，减少几何断裂与纹理不连续现象，实现三维场景的整体一致性与视觉自然性。

本文立足于长江航道实景三维数据生产的具体需求，聚焦水陆数据融合中的几何与纹理两大核心难题，提出一种分层处理的融合思路。1）几何层面：提出基于多尺度差异的水陆几何无缝融合方法，通过精确识别陆域模型边界，结合水下地形数据，构建尺度自适应的过渡网格，确保几何拓扑的准确性与连续性；2）纹理层面：提出基于面基元的泊松融合匀色方法，使融合过程在平滑接缝的同时，优先保持陆域地物（如建筑、植被）的关键纹理特征，提升融合结果的视觉真实感；3）试验验证：通过严谨的定性与定量试验，分析验证该方法的优越性，并在一段实际航道中展示其工程化应用的可行性与成效。

1　水陆一体化三维数据融合方法

提出一种水陆一体化实景三维数据融合方法，考虑陆域实景三维模型与水下多波束数据在尺度、几何与纹理上的差异，构建边界多尺度自适应过渡网格，实现水陆接边区域的几何无缝融合；基于面基元的泊松匀色方法，在保持源影像纹理特征的同时，实现陆域与水域实景三维模型接缝区域色彩的自然过渡，生成几何连续、视觉一致的水陆一体化三维模型。该方法的核心模块包括几何无缝融合和纹理自然过渡，处理流程见图 1。

水运工程

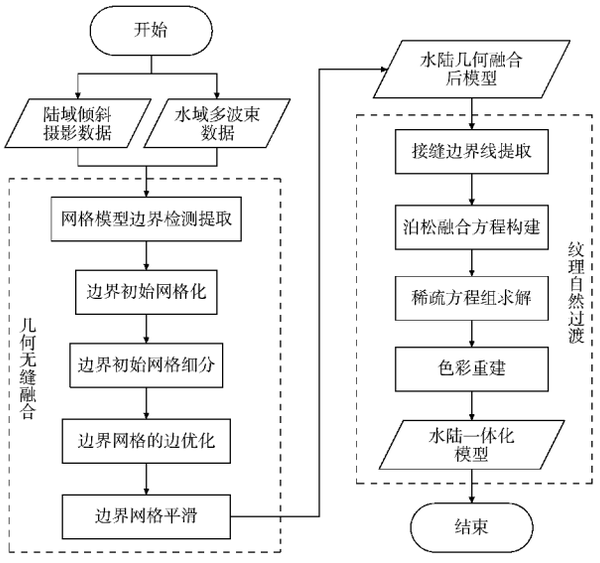

图 1　水陆一体化三维数据融合处理流程

Fig. 1　Workflow of water-land integrated 3D data fusion

1.1　基于多尺度差异的水陆几何无缝融合方法

陆域实景三维模型通过无人机搭载倾斜相机获取厘米级影像数据搭建而成，水下地形数据则以多波束数据为基础，经过组合导航解算、去噪、坐标转换等处理，形成与陆域统一参考系下的米级采样间隔的点云成果，两者在细节尺度上差异巨大，且受限于采集条件，岸边浅滩水下地形存在数据缺失带，见图 2，若直接融合会导致几何拓扑错误。

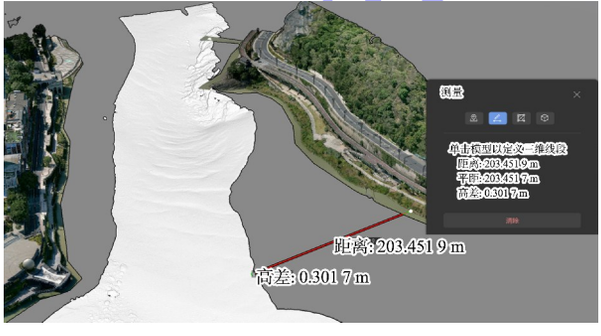

图 2　陆上三维数据与水下地形之间缺失地段长度

Fig. 2　Length of missing segments between terrestrial 3D data and underwater terrain

受上述数据特征影响，现有基于法向、拓扑、构网规则共同组成的能量函数求解多个尺度相当的倾斜网格的融合方法不再适用，因此，采用基于多尺度差异的水陆几何无缝融合方法，提取陆上实景三维边界，结合水下地形数据进行初始化构网及网格平滑、优化处理，实现空洞区域数据的插值填充，使得实景三维模型与水下地形数据接缝处实现几何的无缝融合。

1.1.1　网格模型边界的检测与提取

在三角网格模型中，若一条边仅与单个三角面相邻，则该边可视为模型的边界边。基于这一特性，遍历网格中所有边，识别并提取所有边界边；然后将拓扑上首尾相连的边界边进行有序连接，形成描述模型开放区域的边界多段线集合，即模型边界 B_{hole}。该过程为后续边界区域的网格构建提供了明确的几何约束。

$$B_{\text{hole}} = \{v_1, v_2, \cdots, v_n\} \tag{1}$$

式中：v_i 为边界上的顶点，$i = 1, 2, \cdots, n$。

1.1.2　边界区域的初始三角网格构建

为填补边界区域并生成可参与后续处理的三角网格，采用一种基于边界约束的初始网格构建策略，通过对边界顶点进行逐步消减，实现边界区域的局部三角剖分，在保持边界几何特征的前提下生成拓扑合理的初始三角网格，为后续精细化处理提供基础结构。

1）遍历边界上的顶点 v_i，并综合考虑新生成三角面与其相邻三角面的二面角、新三角面的形状质量以及边界边夹角等几何因素，计算顶点权重值 w_i：

$$w_{\text{dihe}} = 1.0 - \frac{\max\{\theta_1, \theta_2\}}{180} \tag{2}$$

$$w_{\text{shape}} = \frac{(l_{\min} + l_{\text{mid}} - l_{\max})}{l_{\max}} \tag{3}$$

$$w_\theta = 1.0 - \frac{\theta}{180} \tag{4}$$

$$w_i = 0.35 w_{\text{dihe}} + 0.45 w_{\text{shape}} + 0.2 w_\theta \tag{5}$$

式中：w_{dihe} 为新添加的三角面与其邻接 2 个三角面的二面角权重；w_{shape} 为三角面接近正三角形的程度；$l_{\min}$、l_{mid}、$l_{\max}$ 分别为三角面 3 条边长度的最小值、中间值和最大值；w_θ 为顶点连接的两条边界边的夹角权重；θ 为顶点连接两条边或三角面相邻边的夹角；θ_1、θ_2 为新三角面邻接的 2 个三角面的二面角。

2）每次选取权重最大的顶点，在其邻域内构

建新的三角面。若新生成边的长度或邻接边的夹角不满足几何约束，则进行边分裂。分裂点的初始位置位于边的中点，并根据邻接边夹角的角平分线与邻接边拟合椭圆的交点进行分裂点位置调整。

3）完成三角面构建后，将该顶点从边界集合中移除，并更新其他相邻顶点的权重值，重复上述过程直至边界区域被完全网格化。

1.1.3　边界初始网格的自适应细分

针对初始生成的边界网格可能存在与原有陆域或水下网格尺度不一致的情况，直接拼接容易产生尺度突变，因此需要对边界网格进行自适应细分。通过计算顶点及三角面的局部尺度，判断网格是否需要进一步细分，使边界区域网格尺寸逐渐过渡到周围网格的尺度。

计算初始网格中每个顶点的尺度，即顶点 v_i 邻域边长度的平均值：

$$\sigma(v_i)=\frac{1}{n}\sum_{j=1}^{n}\|v_i-v_j\| \tag{6}$$

式中：v_j 为 v_i 的一环领域顶点。

遍历初始网格中的每个三角面 $f(v_i,v_j,v_k)$，计算三角面的重心点 v_c，以及重心点的尺度 $\sigma(v_c)$：

$$\sigma(v_c)=\frac{\sigma(v_i)+\sigma(v_j)+\sigma(v_k)}{3} \tag{7}$$

若满足条件：

$$\alpha\|v_c-v_m\|>\max\{\sigma(v_c),\sigma(v_m)\},m=i,j,k \tag{8}$$

则 $\alpha=\sqrt{2}$，将三角面细分为 3 个小三角面，记为 (v_c,v_j,v_k)、(v_i,v_c,v_k)、(v_i,v_j,v_c)。

1.1.4　边界网格的拓扑优化

在细分过程中可能引入形状不规则或质量较差的三角面，通过边界区域网格拓扑优化，降低瘦长三角面比例，提高网格的整体几何质量与稳定性。

遍历网格中每条边，分别计算与该边相邻 2 个三角面 f_i 与 f_j 的外包球关系。若某一个三角面的顶点落入另一个三角面的外包球内，则认为该边不满足质量要求，对该边执行边交换操作，重新连接顶点，改善三角面形状。

1.1.5　边界三角网格的平滑处理

经过多次构建与优化后，边界网格可能仍存在局部不平顺现象，采用拉普拉斯平滑方法，通过邻域顶点的加权平均位置对当前顶点的坐标值进行调整，使网格在保持整体形态的同时消除局部不规则性，实现水陆模型接边区域的平滑过渡。

计算邻域顶点 v_j 对顶点 v_i 的影响权重 $w_{i,j}$，权重越大，表示两顶点的距离越近。

$$w_{i,j}=\frac{1}{\|v_i-v_j\|} \tag{9}$$

计算每个顶点的新位置：

$$v_i^{\text{new}}=\frac{\sum_{j=1}^{n}(w_{i,j}v_j)}{\sum_{j=1}^{n}w_{i,j}} \tag{10}$$

通过上述边界识别、初始网格构建、自适应细分、拓扑优化及平滑处理等步骤，有效填补了水陆数据间的几何空隙，实现水陆三维模型交界区域的高质量三角网格重建，保证了几何连续性与网格质量，见图 3。

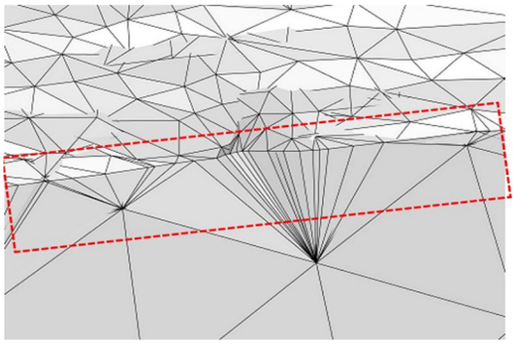

图 3　多尺度几何融合结果

Fig. 3　Results of multi-scale geometric fusion

1.2　基于面基元的泊松融合匀色方法

几何融合后，陆域模型采用真实影像进行纹理映射，而水面模型则通常基于高程伪彩色方法进行赋色。由于两类纹理生成方式在色彩分布与梯度特征上存在显著差异，直接拼接会导致水陆接缝处产生明显的色彩突变与过渡不均匀现象。因此，采用基于面基元的泊松融合匀色方法，在保持源图像梯度特征的同时，对目标区域进行全

水运工程

局约束优化，实现水陆模型接缝区域纹理的自然过渡。

1.2.1　接缝边界线提取

在水陆模型完成几何融合后，对结果进行分析，提取并确定水陆模型之间的接缝边界线。基于此，在接缝两侧构建一定宽度的缓冲区，作为后续纹理融合与颜色优化的处理区域。

1.2.2　泊松方程构建

将接缝处的色彩过渡问题转化为泊松方程求解问题。通过保持源图像在接缝区域内的梯度信息，并以目标图像边界颜色作为约束条件，构建如下泊松方程：

$$\Delta f(x,y) = g(x,y) \tag{11}$$

式中：Δ 为拉普拉斯算子；$f(x,y)$ 为待求解的融合后图像函数；$g(x,y)$ 为已知函数，由源图像与目标图像的梯度场共同确定。该模型通过约束区域内部梯度分布，实现颜色信息的平滑传播。

1.2.3　泊松方程求解

针对离散化后的泊松方程，构建稀疏线性方程组，采用 Eigen 库的 LU 分解算法求解稀疏线性方程组，获得接缝缓冲区每个像素点的最优颜色调整值。此过程在最小化接缝区域内部的颜色梯度变化的同时，保证其边界颜色与外部伪彩色区域的连续性与一致性。

1.2.4　色彩重建与融合

将求解得到的像素颜色值回填至接缝缓冲区，对水陆模型接缝区域进行颜色重建，实现纹理的平滑过渡与自然融合。

通过上述基于泊松方程的纹理融合流程，在像素级别进行全局优化，避免了传统羽化引入的模糊效应。试验结果表明，泊松融合前，水陆交界处纹理色彩突变，见图 4a)；融合后交界区域的纹理过渡显著改善，整体呈现出连续、自然的视觉效果，见图 4b)。结果表明该方法在保持整体纹理平滑一致性的同时，有效约束了接缝边界处的颜色特征，使融合区域与源图像在色彩分布上高度一致，从而显著提升了水陆三维模型接缝区域的视觉连续性与真实感。

a) 泊松融合前水陆纹理突变

b) 泊松融合后水陆纹理过渡自然

图 4　泊松融合接缝色彩过渡前后对比

Fig. 4　Comparison of seam color transition before and after Poisson fusion

2　南京航道局辖区桥区示范应用

2.1　试验区域与数据

试验区域位于南京航道局辖区桥区航道，该区域水系丰富，水运条件发达，是集桥区、浅区以及历史沉船等重要地理特征为一体的典型航道。该区域的水陆数据一体化融合示范应用具有重要代表性，可为长江干线其他河段的建设提供可复制、可推广的模板，同时也为该区域的航道管理提供强有力的数据支撑。

试验区域总面积 8.8 km^2，河床长度 5.9 km，涵盖了多维度的水陆信息，包括水岸线、航标、桥梁、码头以及周边岸线环境等。基于航道局已有的辖区桥区周边陆域地理模型，补充采集长江流域两端上、下游周边数据，共采集 6 656 张照片，利用实景三维模型重建技术，生成航道周边陆域地理模型(图 2)。通过对多波束测深系统获取的水深数据进行预处理、坐标转换、点云配准、三角网构建等处理，生成水下地形三维模型，如图 2 中白色区域所示。由于采集方式等原因，基

于采集数据构建的陆域模型与水域模型之间存在数据缺失。以上生成的陆域及水域三维模型为水陆一体化融合建模提供数据基础。

2.2　结果与分析

将上述构建完成的南京航道周边陆域模型及水下地形数据进行交界区构网、优化与平滑处理，完成水陆三维模型的几何无缝融合；结合水深属性信息对水下地形模型进行赋值与可视化表达，使得水域与陆域都具备纹理信息，见图 5，图中陆域三维模型的纹理是根据航拍和现有实景三维成果所获取的真实纹理，图中区域为采用高程伪彩色赋色后效果。

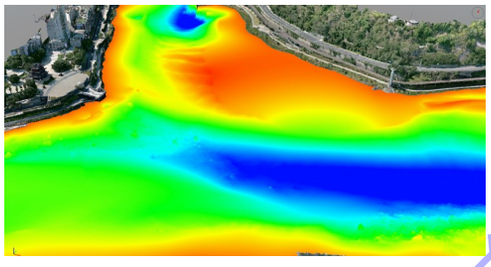

图 5　南京航道局辖区水陆模型几何融合及赋色效果
Fig. 5　Geometric fusion and color results of water-land models in the jurisdiction of Nanjing Waterway Bureau

针对水陆模型交界处色彩突变现象，构建泊松模型，成功消除接缝区域色彩跳变，使陆域实景纹理与水域伪彩色之间的过渡更加平滑自然，见图 6。

图 6　南京航道局辖区水陆交界泊松融合后效果
Fig. 6　Poisson fusion effect at water-land boundary in the jurisdiction of Nanjing Waterway Bureau

经过以上几何无缝融合和纹理自然过渡处理，最终生成南京航道局辖区航道拓扑结构连续、接边无缝、色彩连贯、过渡自然的水陆一体化模型，见图 7。

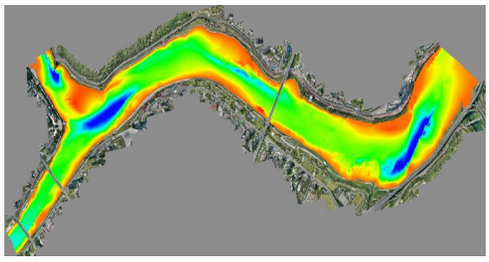

图 7　南京航道局辖区桥区水陆融合实景三维模型
Fig. 7　Integrated water-land 3D model of bridge area in Nanjing Waterway Bureau

结果表明：1）几何融合效果提升，成功构建了连接陆域模型与水下地形的连续三角网，消除了原有的数据空洞和尖锐裂隙，水岸线几何形态连续自然；2）纹理融合效果改善，经泊松融合处理后，水陆接缝处的颜色跳跃现象基本消除，从陆域的真实纹理到水域的伪彩色实现了平滑渐变，视觉效果显著改善。融合后的水陆一体化模型满足了航道数字孪生底座对空间一致性和视觉真实感的基本要求。

3　结论

1）针对陆域高分辨率实景三维模型与水域多波束数据在尺度、密度及拓扑结构上的差异，构建了基于多尺度几何拓扑约束的水陆模型几何融合方法，试验结果表明，该方法能够在水陆交界区域形成连续、稳定的三角网结构，有效消除原始数据叠加造成的几何空洞和裂隙，水岸线形态连续自然，几何完整性和空间一致性显著提升。

2）针对水陆模型纹理来源差异引起的接缝色彩突变问题，引入基于面基元的泊松融合匀色方法，在接缝缓冲区内进行全局优化。试验结果显示，经泊松融合处理后，水陆交界处的颜色跳变现象基本消除，纹理过渡由“硬接边”转变为平滑渐变，在保持陆域真实纹理特征的同时，实现了水域伪彩色与陆域纹理的自然衔接，整体视觉一致性明显改善。

3）综合几何与纹理融合效果，采用基于多尺度几何拓扑与泊松融合的水陆实景三维数据无缝融合方法，最终生成水陆一体化实景三维模型，在拓扑连续性、几何完整性及视觉真实感方面均

满足航道数字孪生底座的应用需求，实现从平面到立体的全面升级，提高航道管理的空间感知能力，可为航道管理、运行监测及辅助决策提供直观、可靠的三维空间表达。

参考文献：

[1] 自然资源部. 实景三维中国建设总体实施方案(2023—2025 年)[EB/OL]. (2023-03-06)[2025-07-01]. https://www.bingbai.cn/Public/Uploads/uploadfile/files/20231103/shijingsanweizhongguojianshezongtishishifangan20232025nian.pdf.
Ministry of Natural Resources. General implementation plan for the construction of 3D reality in China (2023–2025) [EB/OL]. (2023-03-06) [2025-07-01]. https://www.bingbai.cn/Public/Uploads/uploadfile/files/20231103/shijingsanweizhongguojianshezongtishishifangan20232025nian.pdf.

[2] 交通运输部. 关于加快智慧港口和智慧航道建设的意见[EB/OL]. (2023-12-04)[2025-08-01]. https://xxgk.mot.gov.cn/2020/jigou/syj/202312/t20231204_3961959.html.
Ministry of Transport. Opinions on accelerating the construction of smart ports and smart waterways[EB/OL]. (2023-12-04)[2025-08-01]. https://xxgk.mot.gov.cn/2020/jigou/syj/202312/t20231204_3961959.html.

[3] LI Z X, PENG Z T, ZHANG Z, et al. Exploring modern bathymetry: a comprehensive review of data acquisition devices, model accuracy, and interpolation techniques for enhanced underwater mapping [J]. Frontiers in marine science, 2023, 10: 1178845.

[4] 江木春, 袁锐, 牛作鹏. 三维激光扫描技术在北江航道沿线水上物外观测量中的应用[J]. 水运工程, 2022(11): 160-164.
JIANG M C, YUAN R, NIU Z P. Application of 3D laser scanning technology in appearance measurement of aquatic objects along Beijiang channel[J]. Port & waterway engineering, 2022(11): 160-164.

[5] CHEN L, LIU L Z, LIU S S, et al. The application of remote sensing technology in inland water quality monitoring and water environment science: recent progress and perspectives[J]. Remote sensing, 2025, 17(4): 667.

[6] LUBCZONEK J, KAZIMIERSKI W, ZANIEWICZ G, et al. Methodology for combining data acquired by unmanned surface and aerial vehicles to create digital bathymetric models in shallow and ultra-shallow waters[J]. Remote sensing, 2022, 14(1): 105.

[7] 王建雄, 杨俊凯, 杨振林, 等. 多源数据融合在滩涂测绘中的应用[J]. 水运工程, 2025(4): 170-175.
WANG J X, YANG J K, YANG Z L, et al. Application of multi-source data fusion in intertidal zone surveying[J]. Port & waterway engineering, 2025(4): 170-175.

[8] 王进科. 基于浅海岸水陆一体化建模研究与应用[J]. 测绘通报, 2025(S1): 281-285.
WANG J K. Research and application of integrated land-water 3D modeling for shallow coastal zones[J]. Bulletin of surveying and mapping, 2025(S1): 281-285.

[9] YANG F L, YU X L, WANG X K, et al. Fusing multiplatform topo-bathymetric point clouds based on a pseudo-grid model: a case study around Ganquan Island, South China Sea[J]. International journal of applied earth observation and geoinformation, 2025, 139: 104492.

[10] LEWICKA O, SPECHT M, STATECZNY A, et al. Integration data model of the bathymetric monitoring system for shallow waterbodies using UAV and USV platforms[J]. Remote sensing, 2022, 14(16): 4075.

[11] SORKINE O, COHEN-OR D, LIPMAN Y, et al. Laplacian surface editing[C]//Proceedings of the 2004 Eurographics Symposium on Geometry Processing, Switzerland: The Eurographics Association, 2004: 175-184.

[12] 高松涛, 李锦明, 邱赞富, 等. 基于 Laplacian 算子的航飞影像预处理分析[J]. 测绘与空间地理信息, 2024, 47(1): 176-179.
GAO S T, LI J M, QIU Z F, et al. Preprocessing analysis of aerial images based on Laplacian operator [J]. Geomatics & spatial information technology, 2024, 47(1): 176-179.

[13] WANG F, ZHU H C, CAI H L, et al. A parallel method for texture reconstruction in large-scale 3D automatic modeling based on oblique photography [J]. Remote sensing, 2022, 14(9): 2160.

[14] YU Y, ZHOU K, XU D, et al. Mesh editing with poisson-based gradient field manipulation [J]. ACM Transactions on graphics, 2004, 23(3): 644-651.

（本文编辑　赵娟）