

一种融合多源瓦片地图服务的真实感水面三维渲染方法

蒋如乔

园测信息科技股份有限公司，江苏 苏州 215000

DOI: 10.61369/SSSD.2026040018

摘 要： 数字孪生城市建设对三维真实感渲染提出了更高要求，特别是水体等高度动态自然要素的表现。传统基于固定网格与预制法线纹理的水面渲染方法在城市级大场景下易产生波纹重复、效果单一和内存开销过高的问题。本文提出一种融合多源瓦片地图服务的真实感水面渲染方法，将矢量瓦片的水体边界精度与影像瓦片的真实波纹纹理信息协同表达，通过动态扰动叠加与物理着色模型实现大规模水域的实时自然渲染。实验结果表明，该方法在保障渲染性能的同时，显著提升了水面视觉真实感与区域差异性，为数字孪生城市三维可视化提供可行技术路径。

关 键 词： 水面渲染；瓦片地图；三维可视化；数字孪生城市

A Realistic Three-Dimensional Rendering Method for Water Surfaces that Integrates Multiple Source Tile Map Services

Jiang Ruqiao

Yuance Information Technology Co., Ltd., Suzhou, Jiangsu 215000

Abstract： Digital twin cities demand higher realism in 3D visualization, especially for dynamic water surfaces. Traditional mesh-based methods using pre-defined normal textures often lead to repetitive waves, limited visual variation, and high memory usage in large urban scenes. This paper proposes a lightweight water rendering approach integrating vector and raster tile services. Precise water boundaries from vector tiles and real wave textures from imagery tiles are combined, while time-based perturbations and physically based shading achieve natural dynamic effects. Experiments show improved visual realism and spatial diversity with stable real-time performance, supporting scalable water visualization for digital twin city applications.

Keywords： water surface rendering; tile map; 3D visualization; digital twin city

引言

数字孪生城市旨在实现现实空间的高保真映射，三维渲染能力直接影响其表现力与决策辅助能力。水面作为城市景观与治理的重要对象，具有动态、反射、透明等复杂物理特性，高真实感模拟一直是可视化领域的研究重点。

现有三维水面渲染技术主要依赖预制纹理或网格模型，难以保持区域差异性，且计算量大、扩展性弱。动态法线生成^[1]及 GPU 流体模拟^[2]虽提升视觉表现，但难以在 GIS 大场景应用。瓦片化技术缓解了性能压力，但多侧重静态地形渲染，与多源数据融合不足。高分辨率影像可提供真实水纹信息，矢量数据可约束水体边界，深度学习方法已用于水体特征提取^{[3][4]}，遥感数据融合提升信息表达能力^[5]，但动态与一致性仍不足。

因此，本文提出一种融合多源瓦片地图服务的真实感水面渲染方法，以影像驱动法线生成与动态扰动增强为核心，提升大规模场景水体视觉真实度与渲染效率。

一、方法

（一）方法概述

本文提出了一种融合多源瓦片地图服务的真实感水面渲染方法，旨在实现城市级大面积水域场景的实时渲染。整体流程包括：数据发布、瓦片请求、着色器渲染和动态更新^[1-4]。

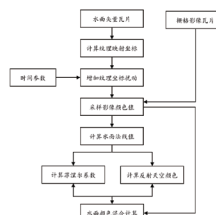


图 1 方法流程图

(二) 矢量与影像地图服务数据融合

将水面矢量数据与遥感影像分别发布为矢量瓦片与栅格瓦片服务,采用统一切片方案,确保相同行列号瓦片的空间范围一致。前端根据 $tileZ$ 、 $tileX$ 、 $tileY$ 请求当前视域内所有瓦片,通过 $tileID=[tileZ,tileX,tileY]$ 可唯一定位瓦片,实现水面范围与对应影像纹理的高精度对齐,并支持城市级场景渐进式加载与实时渲染。

(三) 水体动态波纹模拟

在获取相同行列号瓦片后,将影像瓦片作为纹理传入水面片元着色器,通过纹理坐标映射采样其颜色值,基于亮度差异计算局部波面高度,再利用 Sobel 算子提取梯度生成法线向量,以表示真实水纹起伏。同时构建基于时间参数的周期扰动函数,对波纹进行动态更新,使水面呈现连续自然的流动效果。该过程在 GPU 中实时完成,具有性能开销低、动态表现真实等特点。

1. 纹理映射与颜色信息计算:通过计算片元纹理坐标实现与影像像素的空间映射,从而获取对应的真实水纹颜色信息,用于后续法线与动态效果计算。水面矢量瓦片与栅格影像瓦片的映射关系。坐标 $coordFrag(u,v)$ 计算过程如下:

$$vPos = (vertX, vertY) \quad (1)$$

$$coordFrag = \frac{vPos}{tileSize} \quad (2)$$

其中 $vPos$ 表示当前片元的几何顶点坐标, $(vertX, vertY)$ 表示当前片元在矢量瓦片中的坐标值,可从顶点着色器传入。 $tileSize$ 表示瓦片像素大小,由瓦片地图服务决定,在本方法中,需要保证矢量瓦片的 $tileSize$ 与栅格瓦片 $tileSize$ 一致。

2. 水面法线计算:在水面矢量瓦片片元着色器中,基于纹理映射坐标获取栅格影像瓦片中的颜色值。通过图像分析处理算法^[5-8],计算水面高度值,并基于此计算水面法线。在水面矢量瓦片片元着色器中,基于前片元在栅格影像瓦片中的颜色计算水面法线。

a. 基于纹理映射坐标获取栅格影像瓦片中的颜色值

通过当前片元的纹理映射坐标 $coordFrag(u,v)$,对栅格影像瓦片进行纹理采样,即获取栅格瓦片图像中像素坐标为 (u,v) 的像素值,像素值包括红绿蓝三个通道,以数组 $[r,g,b]$ 存储,表示为 $texColor(r,g,b)$,纹理采样通过 GLSL 内建函数 $texture2D()$ 实现,具体如下:

$$\begin{aligned} texColor &= f_{TexColor}(tileImage, coordFrag) \\ &= texture2D(tileImage, coordFrag) \end{aligned} \quad (3)$$

其中 $tileImage$ 表示传入当前矢量瓦片着色器中的栅格影像瓦片图像, $coordFrag$ 为当前片元的纹理映射坐标, $f_{TexColor}(tileImage, coordFrag)$ 表示基于栅格影像瓦片图像和片元纹理映射坐标取对应像素颜色值的函数。

b. 基于水面颜色值计算水面法线

以上采样所获取的栅格影像颜色值,即为影像图像中水面的真实颜色值,在真实世界中,水面流动导致高度变化,形成波纹效果,在影像图像中体现为颜色的明暗程度不同,因此可以通过水面颜色的明暗变化,通过图像分析处理算法,计算水面高度,

进而计算水面法线。

c. 基于影像中水面颜色计算水面高度

提取的影像水面颜色值为 $texColor$, 包含红 (R)、绿 (G)、蓝 (B) 三个通道,在本方法中将 RGB 颜色值经过加权平均计算灰度值,将灰度值作为高度值,用于水面法线计算,具体计算方法为:

$$\begin{aligned} f_{texGray}(texColor) &= 0.2126 * texColor[0] + 0.7152 * \\ &texColor[1] + 0.0722 * texColor[2] \end{aligned} \quad (3)$$

$f_{texGray}(texColor)$ 表示基于颜色值计算灰度值公式,以上公式为图像处理领域较为常用的转换公式,基于人眼感知提取,可根据实际图像特征调整,本方法仅用于流程说明,不对公式做限制。

d. 基于水面高度值计算水面法线

基于高度值计算水面各点实际的法线法线,还原水面各位置高度差。本方法采用 sobel 算子计算提取。在多元微积分理论中,梯度垂直于高维曲面,因此可以基于梯度值构建法线向量,具体过程如下:

$$\vec{N}_{grad} = (gradX, gradY, 1) \quad (8)$$

$$\vec{N} = \frac{\vec{N}_{grad}}{|\vec{N}_{grad}|} \quad (9)$$

$\vec{N}$ 表示当前片元的法线向量。

由于法线向量的数值范围为 $[-1, 1]$,为了将法线值存储为颜色值,将法线向量转换到 $[0, 1]$ 范围,具体过程如下:

$$\vec{NC} = \vec{N} * 0.5 + 0.5 \quad (10)$$

$\vec{NC}$ 表示当前片元法线向量的用颜色值表达的向量。

3. 扰动叠加:为片元纹理坐标加入周期扰动,使基于静态影像生成的法线和颜色随时间变化,实现水面波纹的动态流动效果。对当前瓦片纹理映射坐标 $coordFrag(u,v)$,添加周期重复性扰动:

$$uv_0 = (3 * coordFrag + 0.015 * time) \% 1 \quad (11)$$

$$uv_1 = (2 * coordFrag - 0.025 * time) \% 1 \quad (12)$$

其中 $coordFrag$ 为当前瓦片纹理映射坐标, $time$ 为当前系统时间,以秒为单位的时间戳, uv_0 和 uv_1 为叠加了周期重复性扰动的瓦片纹理映射坐标。

采用步骤 3.3 方法采用扰动后的瓦片纹理映射坐标 uv_0 和 uv_1 计算水面法向量 $\vec{N}_1$ 、 $\vec{N}_2$,将 $\vec{N}_1$ 、 $\vec{N}_2$ 进行加权平均后作为扰动后的法向量。

$$\vec{N}_{avg} = \frac{\vec{N}_1 + \vec{N}_2}{2} \quad (13)$$

$$\vec{N}_{final} = \frac{\vec{N}_{avg}}{|\vec{N}_{avg}|} \quad (14)$$

基于叠加扰动的法向量采用步骤 3.4 方法重新计算水面颜色值,对当前片元进行着色。随着时间变化,地图渲染引擎通过每帧更新时间参数,重新计算法线向量和水面颜色值,刷新地图窗口,实现水面矢量瓦片渲染的周期性流动效果。

(四) 真实感水面三维渲染

采用基于菲涅尔效应的反射系数计算,使光照表现随观察视

角变化,提高光泽与透明交互真实性。结合天空盒贴图采样环境光反射颜色,最终颜色由影像颜色、水体反射颜色与菲涅尔系数融合得到,呈现真实的水色变化与高光反射效果^[9-10]。

(1) 光照与反射计算:采用漫反射模型计算水面反射系数,并基于菲涅尔公式计算菲涅尔反射系数。计算光线在当前片元的反射方向,并通过立方体贴图方式模拟天空,采样天空颜色值。

(2) 水面反射系数计算:采用漫反射模型计算水面反射系数,漫反射现象为光线投射到物体表面后向各个方向均匀反射,反射强度与视线无关,即从各个视角观察物体所呈现的颜色一致。基于漫反射模型可以模拟水面的基础颜色以及水波纹效果,漫反射系数与光线和表面法线夹角相关,光线与法线夹角越大反射越强,夹角越小反射越弱。具体计算方式如下:

$$LN\theta = \vec{L} \cdot \vec{N} \quad (15)$$

$$\text{diffuseR} = \begin{cases} LN\theta, LN\theta > 0 \\ 0, LN\theta < 0 \end{cases} \quad (16)$$

$\vec{L}$ 为光线的方向向量,在三维场景中定义,可以通过当前位置、日期和时间计算,计算方法为常用方法,在此不再赘述。 $\vec{N}$ 为 3.3 所计算的当前片元法线向量。

(3) 菲涅尔反射系数计算:基于水面反射系数和近似菲涅尔公式计算菲涅尔反射系数,具体计算公式如下:

$$\text{eyeTheta} = \vec{E} \cdot (0, 0, 1) \quad (17)$$

$$\text{fresnelR} = \text{diffuseR} + (1.0 - \text{diffuseR}) * (1.0 - \text{eyeTheta})^5 \quad (18)$$

其中 $\vec{E}$ 为视线方向, diffuseR 为步骤 3.4.1 计算的漫反射系数。

(4) 反射天空颜色计算:基于光线方向和当前法线方向,计算光线在当前片元的反射方向,具体计算方式如下:

$$\vec{LR} = \vec{L} - 2 * \vec{N} \cdot \vec{L} * \vec{N} \quad (19)$$

$\vec{L}$ 为光线的方向向量, $\vec{N}$ 为当前片元法线向量, $\vec{LR}$ 为光线在当前片元的反射方向向量。

采用立方体贴图方式模拟天空,基于当前片元的反射方向采样天空颜色值,具体计算方式如下:

$$\text{skyColor} = \text{texture}(\text{cubeMapTex}, \vec{LR}) \quad (20)$$

cubeMapTex 为天空盒立方体贴图,可以在程序中预制加载并传入着色器中, $\text{texture}()$ 为 GLSL 内置函数,用于对立方体贴图进行采样, skyColor 为最终计算的当前片元反射天空颜色值。

(5) 颜色混合:基于当前片元所对应的栅格影像颜色值、反射天空颜色值和菲涅尔反射系数进行颜色混合,计算得到最终渲染的水面颜色值。基于当前片元所对应的栅格影像颜色值 texColor 、当前瓦片反射天空颜色值 skyColor 、当前瓦片菲涅尔反射系数 fresnelRef 进行颜色混合,计算得最终渲染的水面颜色。通过本方法计算得的水面颜色,可以较为接近真实水体颜色与真实水体波纹效果。

$$\text{waterColor} = \text{texColor} * (1 - \text{fresnelR}) + \text{skyColor} * \text{fresnelR} \quad (21)$$

(6) 实时更新与渲染:计算得的当前瓦片纹理映射坐标 $\text{coordFrag}(u, v)$, 添加周期重复性扰动:

$$uv_0 = (3 * \text{coordFrag} + 0.015 * \text{time}) \% 1 \quad (22)$$

$$uv_1 = (2 * \text{coordFrag} - 0.025 * \text{time}) \% 1 \quad (23)$$

其中 coordFrag 为当前瓦片纹理映射坐标, time 为当前系统时间,以秒为单位的时间戳, uv_0 和 uv_1 为叠加了周期重复性扰动的瓦片纹理映射坐标。

采用扰动后的瓦片纹理映射坐标 uv_0 和 uv_1 计算水面法向量 $\vec{N}_1$ 、 $\vec{N}_2$, 将 $\vec{N}_1$ 、 $\vec{N}_2$ 进行加权平均后作为扰动后的法向量。

$$\vec{N}_{avg} = \frac{\vec{N}_1 + \vec{N}_2}{2} \quad (24)$$

$$\vec{N}_{final} = \frac{\vec{N}_{avg}}{|\vec{N}_{avg}|} \quad (25)$$

三、实验结果

本文通以苏州市为例,实验区域:江苏苏州城市区域(约 7504 km²);影像精度:0.17 m DOM;渲染环境:WebGL, NVIDIA RTX 4060, 1920 × 1080;对比方法:静态法线与预制纹理渲染方案。

表 1. 渲染结果比较

指标	传统方法	本文方法
平均帧率 FPS)	58	55
区域差异性	弱	强
动态真实感	一般	明显提升
显存占用	高	随视域缩放最低化
光照表现	模式化	反射更自然

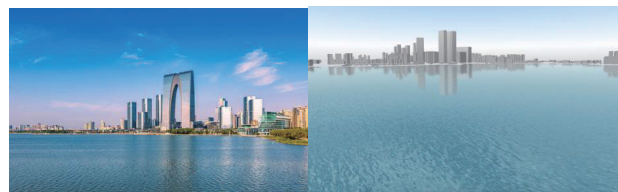


图 3 真实感水面三维渲染效果

将影像地图瓦片化切图后结合矢量水体图斑,进行水体动态波纹法线图、光照图、高度位移图提取,进而使用真实感水面三维渲染方法进行渲染还原自然水体真实效果,结果如下图所示:

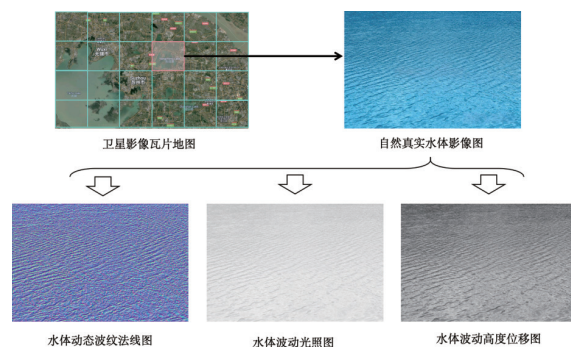


图 2 水体动态波纹提取与模拟

五、结论

本文提出基于多源瓦片融合的真实感水体渲染方法,通过影

像特征驱动法线与周期扰动模型，实现城市级大范围水体的实时动态模拟，改善波纹重复性、提升区域差异性与光照真实度。方法结构轻量，可直接融合现有 GIS/WebGL 渲染体系。

未来研究计划：
(1) 引入时序遥感 / 多帧纹理增强动态精度
(2) 探索与 3DGS/NeRF 相结合的神经渲染水体表达
(3) 应用于水动力与环境要素耦合模拟，提升预测能力

参考文献

[1]Craig, Walter, and Catherine Sulem. "Mapping properties of normal forms transformations for water waves." Bollettino dell'Unione Matematica Italiana 9 (2016): 289–318.Li et al. "Hybrid Eulerian–Lagrangian Fluid Rendering on GPU", IEEE TVCG 2024.

[2] 佟志忠, 姜洪洲, 韩俊伟. GPU 加速的二维流体实时流动仿真. 哈尔滨工程大学学报. 2008;29(3):278–84.

[3] 王鑫, 徐明君, 肖坚, 徐立中. 基于融合视觉词袋的高分遥感水体提取算法. 系统仿真学报. 2022 May 18;34(5):1033.

[4] 白亮亮, 曾超, 盖长松, 黄琦, 龙笛. 基于高分卫星数据多时相重建的水体信息提取. 水力发电学报. 2021 Feb 25;40(2):111–20.

[5] 沈骏翱, 马梦婷, 宋致远, 柳汀洲, 张微. 基于深度学习语义分割模型的高分辨率遥感图像水体提取. 自然资源遥感. 2022 Dec 27;34(4):129–35.

[6] 张磊. 多源异构地图数据的在线集成研究 [D]. 东华理工大学, 2012.

[7] 姜仁贵, 解建仓, 李建勋. 面向防汛的三维预警监视平台研究与应用 [J]. 水利学报, 2012, 43(6):7.DOI:CNKI:SUN:SLXB.0.2012-06-017.

[8] 许新, 苑晓俊, 魏金标, 等. 基于微服务的栅格地图网络化分发技术设计与实现 [J]. 航空电子技术, 2022(053-001).

[9] 陈瑞. 基于多源 POI 数据的匹配融合方法研究 [D]. 兰州交通大学, 2015.

[10] 杨燕景. 基于 MapGIS 的江西省国土资源 "一张图" 建设的技术研究 [D]. 东华理工大学 [2025-10-28].DOI:CNKI:CDMD:2.1013.045733.