引文格式：钱荣荣,赵沛冉,李杰. 地形级实景三维地理场景局部快速绘制方法[J]. 地理空间信息, 2024, 22(10): 79-82. doi:10. 3969/j.issn. 1672-4623.2024.10.019

地形级实景三维地理场景局部快速绘制方法

钱荣荣[1]，赵沛冉[1*]，李　杰[1]
（1. 浙江省测绘科学技术研究院，浙江 杭州 310000）

摘　要：作为数字中国的数字底板和新型基础设施建设的重要组成部分，地形级实景三维通常以地形瓦片的形式进行应用服务和可视化展示，面对实际应用中对重点关注区域地形数据的高现势性要求，如何实现局部区域地形数据的快速更新和展示显得尤为重要。提出一种基于响应式配置组装地形瓦片的方法，从瓦片角度出发，根据用户响应在新旧地形数据中动态更新配置来装载和卸载地形瓦片，并通过双线程技术从数据调度和场景绘制两方面实现三维地形场景的局部更新和绘制。实验结果表明，通过地形瓦片间的管理可以快速有效地实现三维地形场景的局部绘制，且以图层形式实时管理历史数据。

关键词：地形级实景三维；地形瓦片；局部地形更新；响应式配置；双线程
中图分类号：P231　　**文献标志码：**B　　**文章编号：**1672-4623（2024）10-0079-04

Local Rapid Rendering Method for Terrain-level Real Sense 3D Geographical Scene

QIAN Rongrong[1], ZHAO Peiran[1], LI Jie[1]
(1. Zhejiang Academy of Surveying and Mapping Science and Technology, Hangzhou 310000, China)

Abstract: As an important part of digital base plate and new infrastructure construction in Digital China, terrain-level real sense 3D is usually used for application services and visual display in the form of terrain tiles. In the face of the high current requirements of key regional terrain data in practical applications, how to realize the rapid update and display of local terrain data is particularly important. We proposed a method for custom assembling terrain tiles based on responsive configuration. From the perspective of tiles, we dynamically updated the configuration file in the new and old terrain data according to the user's response to load and unload the terrain tile, and realized the local update and rendering of the 3D terrain scene from the aspects of data scheduling and scene drawing through dual threading technology. The experimental results indicate that local rendering of 3D terrain scenes can be quickly and effectively achieved through the management of terrain tiles, and historical data can be managed in real-time in the form of layers.

Key words: terrain-level real sense 3D, terrain tile, local terrain update, responsive configuration, dual threading

目前大范围地形级实景三维场景多以地形瓦片服务的形式在三维可视化应用系统上调用，在解决局部地形数据更新时多采用打包替换的方式将新增数据重新装载到原始数据上，通过重新启动系统进行整体的地形可视化更新[1]。但在实际应用中，局部地形的范围多由用户按临时需求进行选择，具有随机性较大的特点，可能是全部地形范围的一个或多个很小的子范围，通过一次数据处理很难同时完成所有局部地形更新的需求，并且每经过一次打包替换会增加地形瓦片服务的管理成本，造成一份地形瓦片服务里不同区块的现势性不一致。本研究基于地形瓦片服务，通过用户请求响应式配置地形瓦片，将重点关注区域更新瓦片与场景中原始地形瓦片组装，通过双线程技术实现地形级实景三维地理场景局部快速更新和绘制。

1　相关工作

针对大范围地形级实景三维场景的研究多集中在建模方法[2]、渲染算法[3]以及场景编译[4]等方面，而围绕地形快速更新的研究相对较少，且多数基于二维航空影像进行地形级实景三维地理场景的重建更新。例如，刘华光[5]等从遥感卫星监测发现的变化图斑点云数据的角度出发，经过滤波、平滑、接边融合等处理实现地形级实景三维地理场景更新；王慧[6]等提出一种光束法平差前无需迭代的增量式地形更新重建方法，有效剔除错误影像，生成具有强连接性的影像区域，保证了三维地形更新重建成果的可靠性；针对局部水下地形，Liu[7]等有效整合声纳探测数据、制图数据和人工测量数据等多源数据，更新重建了中国东北

收稿日期：2023-06-05。
项目来源：浙江省自然资源厅2021年度科技项目（2021-55）。
第一作者简介：钱荣荣（1990—），硕士研究生，工程师，研究方向为三维模型可视化、计算机图形学，E-mail：qianrrgirl@126.com。
通信作者：赵沛冉（1997—），硕士研究生，研究方向为测绘地理信息，E-mail：1135269476@qq.com。

地区一个水库的底部地形，更新后的平均误差仅为0.56%。随着计算机GPU技术的迅速发展和应用，一些研究基于GPU的实时网格细分技术[8-10]进行地形级实景三维地理场景的渲染更新[11-14]。

2 基于地形瓦片的局部更新与加载

2.1 基于金字塔模型的地形瓦片

大规模复杂三维地形场景包含的信息量十分庞大，一台主流配置的电脑内存容量和CPU处理速度无法一次性承载所有数据，难以满足快速高效的地形瓦片服务发布和自定义的可视化浏览。如图1a所示，本文采取金字塔模型分级分块的思想对地形数据按照从低层级到高层级的顺序进行切片处理，将地形数据分成一组具有不同层级和比例尺的地形瓦片集，上一层级的每个瓦片通过四叉树结构分割为下一层级的地形瓦片，每层瓦片集由相同大小的规则瓦片平铺而成。这种自顶向下的层级关系将地形整体与局部关联，从顶层到底层分辨率越来越高，区域展示的地形内容更加详细，但整体表示的地理范围不变。相对于传统切块方式，在三维地形场景漫游时可以动态地装载和卸载地形数据切片，降低对计算机的性能依赖，为三维地形局部更新提供快速的瓦片式服务。

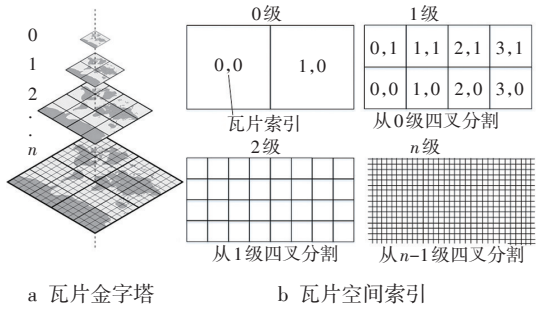


图1 地形瓦片与空间编码

随着金字塔层级的加深，地形瓦片的数量呈指数增加，为了提高瓦片数据的查找调度速率并考虑相同层级的邻接瓦片与不同层级的父子瓦片之间的相互关系，我们通过瓦片间隐含的空间位置关系构建了基于四叉分割的多分辨金字塔索引结构。该结构通过 L 、C 、R 三层编码实现，其中，L 表示待编码瓦片所处的金字塔模型层级，以0开始；C 表示待编码瓦片在该层级的列号，以0开始，从西向东递增编号；R 表示待编码瓦片在该层级的行号，以0开始，从南向北递增编号。如图1b所示，以全球大地坐标（-180°E~180°W）、（-90°S~90°N）的地球地形数据为例，按照左下角为原点，0级地形瓦片边界为（-180°，-90°）-（0°，90°）和（0°，-90°）-（180°，90°）2个图块，其对应的瓦片索引（0，0，0）和（0，1，0）；1级地形瓦片为8个格网，其对应的瓦片索引（1，0，0）、（1，0，1）、（1，1，0）、（1，1，1）、（1，2，0）、（1，2，0）、（1，3，0）、（1，3，0）；然后根据四叉树递归划分上一层级的每个格网，任意已编码瓦片都可以对自身所处的层级 L 或行 R 列 C 号进行简单的加减运算，获取其父子或邻接瓦片的索引编码。在实际编码中，根据重点关注区域的范围大小确定合理的地形瓦片等级。

2.2 基于响应式配置的局部地形更新

地形级实景三维场景在很多应用中需要通过及时更新局部高精度地形数据来构建重点区域的精细场景，针对重点局部区域地形数据的更新，采用一种基于响应式配置的局部地形更新方法，重点关注高分辨率高层级瓦片的更新，其流程主要包括重叠判断、匹配判断、更新判断三部分。其中，重叠判断通过瓦片空间编码快速定位所有变化区域在原始地形瓦片集上对应的高层级瓦片；匹配判断通过响应式配置在原始地形瓦片集的基础上进行瓦片组装，将高层级的更新瓦片与原始瓦片进行一一对应地替换；更新判断根据用户请求的重点关注区域地形的现势性情况，决定是否进行局部更新。

给定一份原始地形数据 A 和其2次更新后的地形数据 B 、C ，其中 B 和 C 是 A 在不同时期下重点关注区域发生变化更新后的地形数据，A 、B 、C 为同类型地形数据产品，因此它们的区域相同、分辨率相同。结合图2和图3瓦片组装策略，基于用户响应实现重点关注区域地形局部更新，具体步骤为：

1）根据2.1节的金字塔模型，将原始地形数据 A 进行多分辨层次切片，生成地形瓦片集。依据原始瓦片集初始化配置信息，内容主要包括切片层级信息（L ）、瓦片索引信息（T_x ，T_y ）、瓦片边界信息（LB ，RB ，LU ，RU ），主要由以下公式获得：

$$\mathrm{Size}=180/2^{L} \tag{1}$$

$$\begin{cases} T_x=\mathrm{floor}[(180+\mathrm{lon})/\mathrm{Size}] \\ T_y=\mathrm{floor}[(90-\mathrm{lat})/\mathrm{Size}] \end{cases} \tag{2}$$

$$\begin{cases} LB=(T_x\times\mathrm{Size}-180,\ 90-(T_y+1)\times\mathrm{Size}) \\ RB=((T_x+1)\times\mathrm{Size}-180,\ 90-T_y\times\mathrm{Size}) \\ LU=(T_x\times\mathrm{Size}-180,\ 90-T_y\times\mathrm{Size}) \\ RU=((T_x+1)\times\mathrm{Size}-180,\ 90-(T_y+1)\times\mathrm{Size}) \end{cases} \tag{3}$$

2）当用户请求更新数据 B 中重点关注区域的现势地形时，A 的瓦片集、包含重点关注区域的更新数据 B 和初始配置进行配准，该过程将用户提供的所有重点关注区域的矩形边界与初始配置中的瓦片边界做二维坐标的相交运算，通过重叠判断建立三者的配准关系。

判断结果如果存在重叠，则从 A 的瓦片集中找出与用户所述范围有重叠的所有最高层级地形瓦片，并将其在初始配置上对应的信息标记保存；判断结果如果不存在重叠，则表明该范围不存在需要局部更新的地形瓦片。假设重叠判断的矩形边界由最大最小值点表示，则瓦片 A 的边界表示为（$x_{A\min}$，$y_{A\min}$），（$x_{A\max}$，$y_{A\max}$），重点关注区域 B 的边界表示为（$x_{B\min}$，$y_{B\min}$），（$x_{B\max}$，$y_{B\max}$），重叠区域的判断依据如下：

$$\begin{cases} x_{\min}=\max(x_{A\min},x_{B\min}) \\ y_{\min}=\max(y_{A\min},y_{B\min}) \\ x_{\max}=\min(x_{A\max},x_{B\max}) \\ y_{\max}=\min(y_{A\min},y_{B\min}) \end{cases} \tag{4}$$

式中，边界通过地理坐标表示。若 $x_{\min}>x_{\max}$ 或 $y_{\min}>y_{\max}$，说明不存在重叠区域；否则重叠区域可表示成（$x_{\min}$，$y_{\min}$），（$x_{\max}$，$y_{\max}$）。

3）根据（2）中保存的初始配置只生成重点关注区域的最高层级地形瓦片，并动态修改响应式配置。该过程按照保存的初始配置（空间编码和瓦片边界）将 B 的重点关注区域只生成最高层级的地形瓦片，并与 A 的瓦片集遍历进行匹配判断，若匹配，则将匹配瓦片对应的配置修改，写入时间信息等最新属性；若不匹配，则对应的配置保留初始信息。

4）进行地形局部更新后的瓦片组装，根据更新后的配置信息，将发生变化的重点关注区域的最高层级瓦片和未发生变化的 A 原始最高层级瓦片进行组装，其他低层级瓦片沿用原始数据 A 的地形瓦片，最后将所有瓦片汇总，获得更新后的三维地形数据 $A+B$。

5）当用户重点关注的区域再次更新时，以相同的方式重复（2）~（4）步骤，根据更新地形数据 C 响应式地修改配置信息，并依据动态调整的配置组装地形瓦片，最终获得瓦片范围的更新数据 $A+B+C$。

整个过程通过动态调整响应式配置将原始地形瓦片与更新变化区域快速匹配，依据配置信息和原始瓦片结构只生成重点关注区域的高层级更新瓦片，将原始数据的低层级瓦片与更新数据的高层级瓦片进行组装拆卸，形成既包含历史信息又包含现势信息的地形级实景三维地理场景，体现了局部更新的灵活高效性。

2.3　双线程局部地形加载策略

如图2所示，基于重点关注区域和瓦片浏览级别，在用户视点变化过程中确定用于在客户端界面上进行显示的地形瓦片，引入双线程技术同时实现数据调度和场景绘制，延用原始地形低层级瓦片，替换更新变化区域高层级瓦片，提高大规模复杂地形场景的局部瓦片加载能力，实现三维地形多角度、多图层、实时生成、显示分析和漫游。

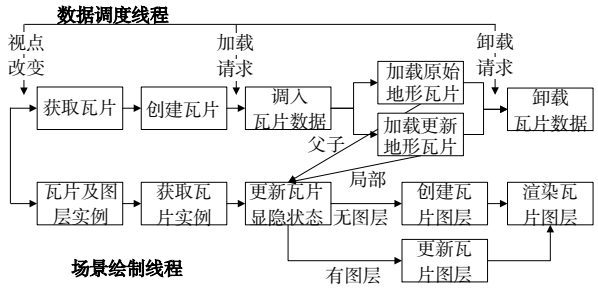


图2　双线程局部加载策略

1）数据调度线程。一方面负责接收数据加载请求，预加载后续可能进入场景视域的瓦片数据，将数据预先从磁盘读入内存；另一方面接收场景数据卸载请求，卸载内存中暂时或将来不需要绘制的瓦片数据，释放内存空间。

在可视化进程中，数据调度线程首先将原始地形场景作为初始化数据加载。数据调度线程依据视点位置动态加载地形瓦片，若视域在重点关注的更新区域，则预先将不在视域的原始地形低层级瓦片卸载，将更新区域的高层级瓦片加载。

2）场景绘制线程。一方面负责向数据调度线程发送数据加载和卸载请求。当用户通过放大、缩小、平移等操作在三维地形场景漫游变化区域时，场景绘制线程会根据当前视点位置向数据调度线程发送瓦片数据加载或卸载请求，加载重点区域地形瓦片，卸载暂时不需要的瓦片；另一方面负责计算瓦片位置和场景实时渲染。该过程计算当前视点位置所需瓦片的索引和坐标范围，根据瓦片索引获取所需的瓦片数据，并通过图层显隐状态来实现更新前后局部瓦片的管理，最终基于Web端实现三维地理场景可视化。

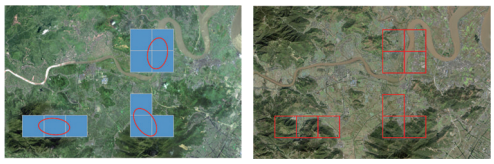
3　实验结果与分析

为了检验地形局部更新与加载展示的实际效果，在Windows环境下选取浙江省某区域2016年、2021年30 m分辨率的DEM数据作为实验数据，以此为基础叠加相应影像数据进行三维地理场景展示，所用数据均是经过脱密变形的公开数据。其中，以2016年地形数据作为原始数据，以2021年地形数据作为局部更新数据。

在地形级实景三维地理场景局部更新实验中，首先通过金字塔模型对2016年地形数据进行切片处理，生成多分辨率地形瓦片集。其中，初始配置由2016年数据的瓦片集定义。为了更好地展示大范围地形级实景三维场景中重点关注区域的地形变化情况，且避免过度切片造成的内存消耗，根据地形数据的精度选择瓦片切分级别，通过表1可知30 m分辨率DEM数据的切分等级

应该在13和14级之间，向下一个级别取14级作为本次实验的最高层级，使用Cesiumlab软件进行切片处理。

当用户请求更新数据中的重点关注区域时，将该区域的范围与原始地形瓦片边界进行求交计算，在原始地形瓦片集中筛选出重叠范围内所有的最高层级（14层级）瓦片，并记录对应的配置，筛选结果如图3a所示；然后，根据重叠关系和记录的配置信息只生成2021年重点关注区域的最高层级地形瓦片，生成结果如图3b所示；之后，通过匹配遍历所有原始地形瓦片和更新地形瓦片更新配置信息，更新前后的配置信息变化如表1所示。最后，根据更新后的配置信息组装地形瓦片，如图4所示。其中，低层级瓦片全部保留；最高层级瓦片中更新部分替换原始瓦片，未更新部分保留原始瓦片。



a 筛选的2016年重叠范围最高层级瓦片　b 生成的2021年重叠范围最高层级瓦片

图3 重叠区域的地形瓦片

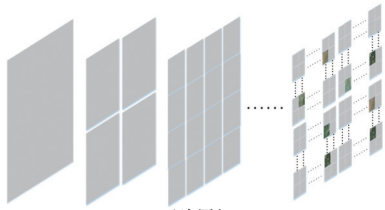


图4 地形瓦片的组装

表1 配置信息变化

信息	初始化配置	更新后配置
地形场景	原始瓦片	更新瓦片+原始瓦片
层级	原始瓦片	更新瓦片+原始瓦片
索引	原始瓦片	更新瓦片+原始瓦片
边界	原始瓦片	更新瓦片+原始瓦片
经度间隔	原始瓦片	更新瓦片+原始瓦片
格网精度	原始瓦片	更新瓦片+原始瓦片
地面分辨率	原始瓦片	更新瓦片+原始瓦片
时间分辨率	原始瓦片	更新瓦片

在地形级实景三维地理场景中加载地形瓦片并进行Web端展示时，效果如图5所示。以2016年地形数据为底图，视点缩小进行大场景地形级地理场景漫游时会加载原始低层级低分辨率地形瓦片，视点放大进行重点关注更新区域浏览时会请求并加载高层级高分辨率地形瓦片，通过控制图层显隐来展示2021年局部地形更新情况，其中1、2、3为原始地形瓦片，4、5、6为2021年更新瓦片，前端资源加载情况如表2所示。

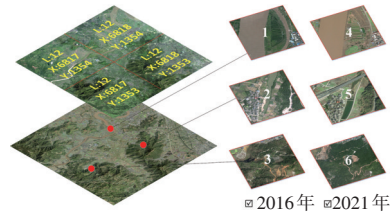


图5 可视化结果

表2 前端加载进程

瓦片编号	瓦片大小/kB	资源调度/ms	建立链接/ms	请求发送/μs	服务器响应/ms	资源下载/ms	总耗时/ms
1	16.2	0.75	0.49	63	2.80	0.27	4.31
2	13.6	0.58	0.50	36	2.32	0.86	4.29
3	14.7	0.42	0.64	44	3.50	0.96	5.36
4	17.1	0.59	1.39	41	2.06	1.17	5.25
5	17.5	0.69	0.62	93	4.14	0.43	5.99
6	16.3	0.52	1.35	64	3.81	1.01	6.74

此外，对本文的策略和执行效率进行了测试，在本文方法的基础上分别去除瓦片组装策略和双线程加载策略作为方法A和B，其中，方法A采用整体替换的方式实现地形局部更新；方法B采用整体刷新绘制的方式实现地形加载。并将本文方法与整体替换方法[5]和GPU网格细分方法[11]在同一份测试数据上进行了对比实验，结果如表3所示。由表3可以看出，本文方法基于瓦片组装策略和双线程加载策略实现较少数据量的局部更新绘制，加载时间优于整体替换更新方法；虽然GPU网格细分方法基于GPU加速更新绘制用时较少，但其改变了地形局部的采样精度，增加了总体数据量。

表3 三维地理场景局部更新绘制统计

方法	更新范围	更新数据的大小/MB	总体数据量的变化情况	加载时间/ms
A	变化区域所有瓦片	950	无变化	188.37
B	变化区域高层级瓦片	275	无变化	108.72
本文方法	变化区域高层级瓦片	275	无变化	69.59
整体替换[5]	变化区域所有瓦片	950	无变化	240.40
GPU网格细分[11]	变化区域地形网格	950	新增细分数据	54.36

4 结 语

针对大范围地形级实景三维场景，从保证地形瓦片统一更新、实现局部地形更新和可视化加载出发，提出了基于响应式配置和双线程的局部地形绘制方法，根据动态调整的响应式配置统一管理所有变化区域的新旧瓦片，最终基于Web前端实现对地形瓦片服务数据的加载展示。实验表明，本文方法的执行效率优于常见方

（下转第99页）