

基于改进GAN的手绘特征草图虚拟地形生成方法

张晓媛, 陈斌

北京大学 地球与空间科学学院, 北京 100871

摘要: 三维虚拟地形生成目前广泛应用于野外虚拟地理环境、数字孪生城市建设等, 是实现地理元宇宙发展的重要组成部分。传统生成三维虚拟地形的存在生成地形真实度不够、重复地形块与网格伪影等问题。基于此, 提出一种改进生成对抗网络的手绘特征草图虚拟地形生成方法。以条件生成对抗网络和pix2pix架构为参考, 提出虚拟地形生成网络模型, 通过改进生成器U-Net网络, 增加随机噪声, 替换损失函数, 提高模型训练的效率及生成地形的真实性。同时, 利用精度较高的黄土高原部分地区数字高程模型数据为样本, 构建用于虚拟地形生成模型的地形特征数据集, 提取真实地形特征开展虚拟地形生成网络训练。最后, 完整构建从手绘特征草图到虚拟地形的模型推理流程。实验结果表明, 利用黄土高原地形数据和改进后的虚拟地形生成模型, 能够满足用户在输入手绘地形特征草图后获得符合地形特征描述、高真实感的虚拟地形, 在三维地形建模与编辑方面具有良好的发展前景。

关键词: 遥感, 三维虚拟地形, 生成对抗网络, 手绘特征草图, 数字高程模型

中图分类号: TP391.9/P2

引用格式: 张晓媛, 陈斌. 2024. 基于改进GAN的手绘特征草图虚拟地形生成方法. 遥感学报, 28(5): 1232-1241

Zhang X Y and Chen B. 2024. Generation method of hand-drawn feature sketch virtual terrain based on improved generative adversarial network. National Remote Sensing Bulletin, 28(5): 1232-1241 [DOI: 10.11834/jrs.20233090]

1 引言

虚拟地理环境 VGE (Virtual Geographic Environment) 是包括化身人类社会以及围绕该主体存在的一切客观环境 (林琿等, 2003, 2010), 包括了地理环境在人脑中的写照以及各种形象思维所产生的“象”, 如“心象地图”、“头脑中的地理场景”等 (林琿等, 2020; 刘浩和薛梅, 2021)。目前, 虚拟地理环境在意象环境下的应用价值日渐凸显。在地理教学上, 根据教学内容设置相关的虚拟场景, 直观展示验证实验条件和结果, 提升虚拟地理实验普适性; 在数字孪生智慧城市、交通与水利模拟领域中, 根据真实地形构建虚拟地形, 为后续开发与实验提供基础环境; 在应急演练模拟中, 快速构建超出出现实场景的极限演练环境, 对提升应急演练水平, 提升应急响应能力等具有重要作用。

意象地图 (Emotional Map) 是一种带有主观认知特性的表达, 能够在地理环境与虚拟环

境之间建立联系 (Gregory等, 2009)。作为意象地图的一种重要自然表达方式, 手绘特征草图可以通过描绘地形特征要素及其拓扑关系来表达真实或虚构地理场景的大致轮廓。然而, 手绘草图是基于二维空间下的简易表达, 对传递地理知识、认知地理环境等具有明显的局限性。因此, 如何利用手绘特征草图快速构建三维地形环境, 生成逼真的虚拟地理环境, 是未来以虚拟地理环境为核心的地理元宇宙创建及发展的重点和难点。

目前, 关于手绘特征草图到虚拟地形跨域生成的研究已经取得一定成果。Zhou等 (2007) 提出了使用山脉、河流等地形走势草图控制地形的粗糙度, 以真实地形的高度场片段组合生成新的地形, 生成用户可控制的、高仿真度的地形, 但该类方法受真实场景限制, 容易出现地形重复的现象。Isola等 (2017) 基于条件生成对抗网络 CGANs (Conditional GANs) 提出图像跨域翻译 pix2pix 框架。Guérin等 (2017) 将其应用于地形

收稿日期: 2023-03-27; 预印本: 2023-05-23

基金项目: 国家重点研发计划 (编号: 2021YFF0500900); 国家自然科学基金面上项目 (编号: 41771442, 41271402)

第一作者简介: 张晓媛, 研究方向为虚拟地理环境。E-mail: xiaoyuan_zhang@stu.pku.edu.cn

通信作者简介: 陈斌, 研究方向为虚拟地理环境。E-mail: gisichen@pku.edu.cn

生成领域，初步实现了基于地形特征概要图的地形生成任务 (Mirza 和 Osindero, 2014; Ronneberger 等, 2015)。上述方法虽为手绘特征草图到虚拟地形的图像跨域生成方面提供了重要参考，但仍存在生成地形真实度不够等问题，尤其是当地形特征概要图过于稀疏时，生成地形会出现重复地形块与网格伪影的情况。

针对上述问题，本文提出一种虚拟地形生成网络模型 VTGANs (Virtual Terrain GANs)。该模型以提取数据样本和手绘草图特性为基础，通过改进生成器 U-Net 网络，增加随机噪声输入，提高生成地形的真实感，尤其是绘制草图中地形特征要素较为稀疏时的细节真实感；替换生成器损失函数，以提高模型训练的稳定性与效率；选取精度较高的黄土高原部分地区数字高程模型 DEM (Digital Elevation Model) 数据制作数据集并用于模型训练，定量对比测试模型改进前后地形生成增强效果；将 VTGANs 应用于真实场景中，在地形及地貌演化背景下观察绘制特征草图生成虚拟地形，测试表明本方法能够很好地表达手绘特征草图，生成的地形基本符合草图描述的地形特征分布及走向，尤其在稀疏草图情况下，生成的地形具有高真实感的地表细节。

2 总体框架与数据流程

2.1 问题描述

本文提出的方法允许用户输入手绘特征草图，草图中可以使用点、线、面等形式表述地形的山谷、山脊和正、负地形（正地形指相对高于邻区或新构造上升地区的地形，负地形指相对低于邻区或新构造下沉地区的地形）分布及走势等特征。根据手绘特征草图生成符合约束的虚拟地形，以数字高程模型的格式输出。生成的虚拟地形应当能够实现：(1) 符合手绘地形特征草图描述中的地形类型、地形走势和地势起伏；(2) 符合真实世界的地质学特征与地貌演化过程，不同地形特征间的过渡流畅；(3) 手绘特征草图的形态依赖于用户的主观性，在绘制的地形特征较为稀疏时适当添加额外的地形细节以贴近真实地形。

2.2 总体框架及数据流程

本文以地形特征选择与提取、VTGANs 网络结构为技术基础，以黄土高原地区 DEM 数据为数据

源构建数据集进行网络模型实验，实现了手绘特征草图的虚拟地形快速生成，开展了虚拟地理实验测试。总体框架图如图 1 所示。

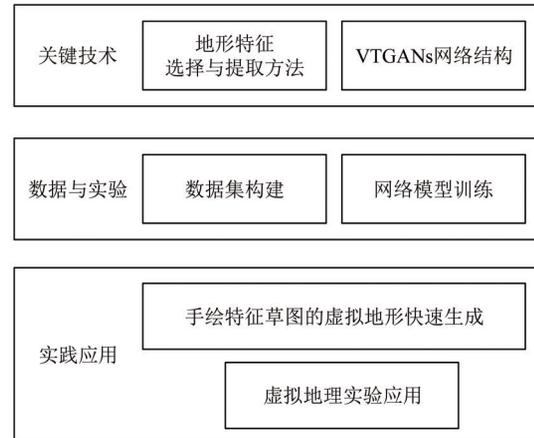


图 1 总体框架图

Fig. 1 Overview framework

本文的数据流程主要分为 3 部分：数据集构建、虚拟地形生成网络模型 VTGANs 以及手绘草图的虚拟地形生成 (图 2)。数据集构建部分是以真实地形的数字高程模型数据为基础，切割与筛选出合适的地形样本，根据真实地形样本生成地形特征图，将地形样本数字高程模型数据与生成的地形特征图数据组合成为数据对，为 VTGANs 模型提供训练和测试数据集。在地形样本切割与筛选时，本文以 Michelson 对比度为标准，剔除地形特征较不明显的地形样本，使数据集整体风格较为统一。针对地形特征图的选择与提取问题，本文对比分析了真实地形高度图与手绘特征草图表达的地形特征，提出使用河流仿真等算法进行地形特征图的生成，通过形态学算法，使生成的地形特征图更加接近手绘特征图效果，提升模型训练效果。手绘特征草图是一张二维图像，三维地形可以表示为一张二维高度图，故可以将手绘特征草图生成虚拟地形的过程抽象为图像跨域生成的过程。本文虚拟地形生成网络模型 VTGANs 部分隐式地对手绘特征草图到地形高度图之间的映射关系进行建模，当输入真实地形提取的地形特征图或用户自定义的手绘特征草图时，模型生成符合其约束的真实感地形高度图。模型包含判别器和生成器 2 个网络，以条件生成对抗网络模型和 pix2pix 架构为基础，考虑地形数据特征和地形细节的生成效果搭建网络模型。本文以黄土高原真实地形为基础得到的数据集输入网络进行训练，

得到 VTGANs 生成器预训练模型，用于手绘特征草图的虚拟地形生成。手绘草图的虚拟地形生成部分支持用户根据真实景观或意向场景在线手绘特

征草图，对不同地形特征分层存储作为模型输入数据，由 VTGANs 生成器预训练模型生成对应的虚拟地形 DEM 数据，并进行三维可视化呈现。

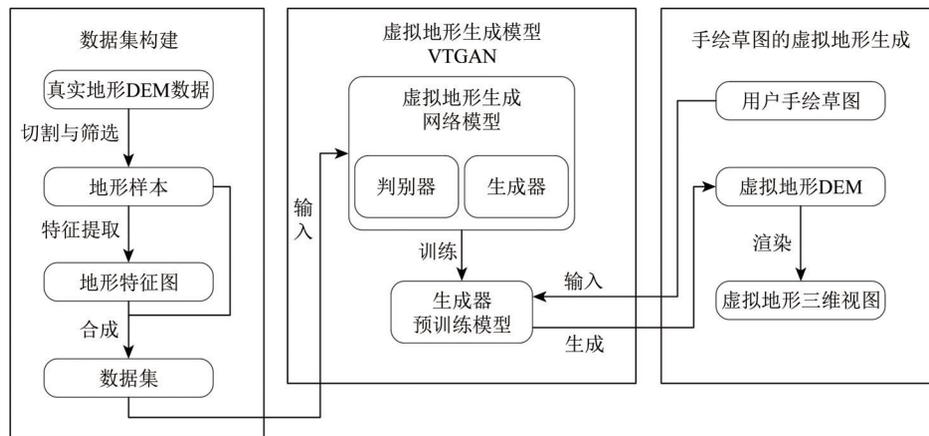


图2 总体数据流程图

Fig. 2 Overall data flow diagram

3 地形特征提取及网络模型搭建方法

3.1 地形特征选择与提取

手绘草图通常以地理空间要素及其拓扑关系表达真实或虚构地理场景的大致轮廓，但目前缺乏与地形 DEM 数据对应的手绘草图数据集。一般情况下，用户在使用手绘草图表达 DEM 图像时，会以线、面等形式绘制地形特征概要图（图 3）。因此，选取与真实地形 DEM 对应的地形特征图代替手绘特征草图作为模型的训练数据集。

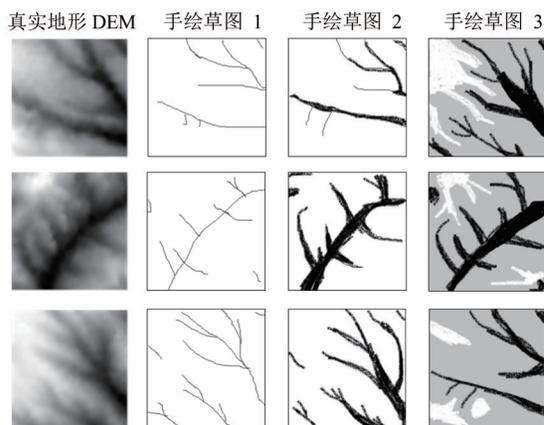


图3 真实地形 DEM 与手绘草图

Fig. 3 Real terrain DEM and hand sketches

地形特征包括点状（如山顶点、鞍部点、河流裂点等）、线状（如山脊线、径流网络线等）以

及面状地形特征（如流域、正负地形区域等）（汤国安等，2017）。选择真实地形作为样本，在其数据范围内，山脊线、山谷线能够反映地势的基本走向，山顶点、鞍部点与山脊线存在一定的重合；正、负地形的划分实质上是区分沟间地与沟谷地的过程，沟沿线是二者的分界线（景可，1986），在实际手绘草图操作中，绘制沟沿线的专业性和难度较大。因此主要选取山谷线、山脊线及正、负地形区域作为地形特征要素。

山谷线和山脊线特征提取主要依赖水流模拟。常用的水流模拟算法为 D8 算法（管伟瑾，2017），该方法在地势起伏较大的多山地区具有较好的适用性。算法核心是通过最大迫降法来计算水流方向，利用水流方向栅格数据计算出汇流累积量，当汇流量大于临界数值的栅格就是潜在水流路径，由这些水流路径可以构成河流特征（Barnes 等，2014）。该算法中水流只流向一个方向，是单线传递，一旦遇到洼地，周边的水流会集中向洼地流入，导致断流的现象。该算法反映的是地形对地表径流形成的作用，当前使用的地形样本数据为 DEM 数据，DEM 数据较易模拟比较光滑的地形表面，内插以及某些地表存在会影响水流模拟的结果。故本文在水流模拟前对地形样本进行填洼，确保水流能够从洼地流出。本文将远离较高地形的坡度与朝向较低地形的坡度叠加来模拟水流（周毅等，2010），设定阈值生成二值化水流累积图，依据双阈值算法获得

水流特征图，经过形态学中膨胀与腐蚀算法得到连续二值图，使用骨架算法提取出单像素水流特征线，即山谷线。地形样本中的山脊线，相当于该样本高程值取反的山谷线。根据式（1）对地形样本的高程数据取反，提取水流特征线，即山脊线。

$$dem_{reverse} = \max(dem) - dem \quad (1)$$

正、负地形特征的提取可以从坡面汇水过程的角度分析（周毅等，2010），使用水流累计图和山脊累计图，经二值化处理后生成正、负地形特征图。根据真实DEM生成地形特征如图4所示。经观察分析可以看出，由算法提取的地形特征图与手绘特征草图有很强的对应性，其中代表山脊线和山谷线的线状特征与草图中线笔画的布局和走向，以及代表正、负地形的面状特征与草图中涂抹色块的形态和分布基本一致。

3.2 虚拟地形生成网络模型结构

VTGANs中生成器（Generator）根据地形特征图生成DEM图像。输入和输出图像的外表面虽不同，但潜在的结构相似，输入和输出可以共享一些底层信息，因此使用U-Net结构将输入的地形特

征信息参与到每一层的采样过程中，增强地形特征在隐形空间中的控制作用，降低了模型崩溃的可能性。在pix2pix架构中（Isola等，2017），生成器输入的条件为特征图像，维度足够大，且生成的图像与特征图像为一对一的对应关系，故生成器输入仅为特征图像。本文考虑到手绘草图存在人为主观的特性，可能存在草图描绘的特征较为稀疏的情况，为保证输出虚拟地形的真实性，提高模型鲁棒性，VTGANs虚拟地形生成器输入为特征图像与随机噪声，且随机噪声输入叠加在特征图像的底层特征上，网络结构如图5所示。

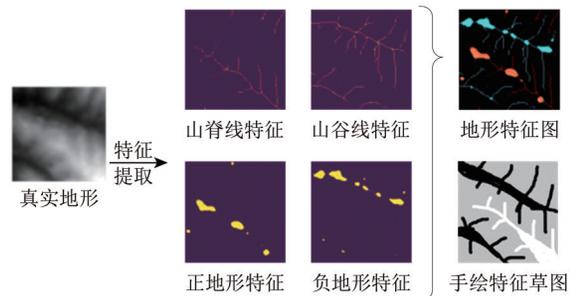


图4 地形特征图
Fig. 4 Topographic feature map

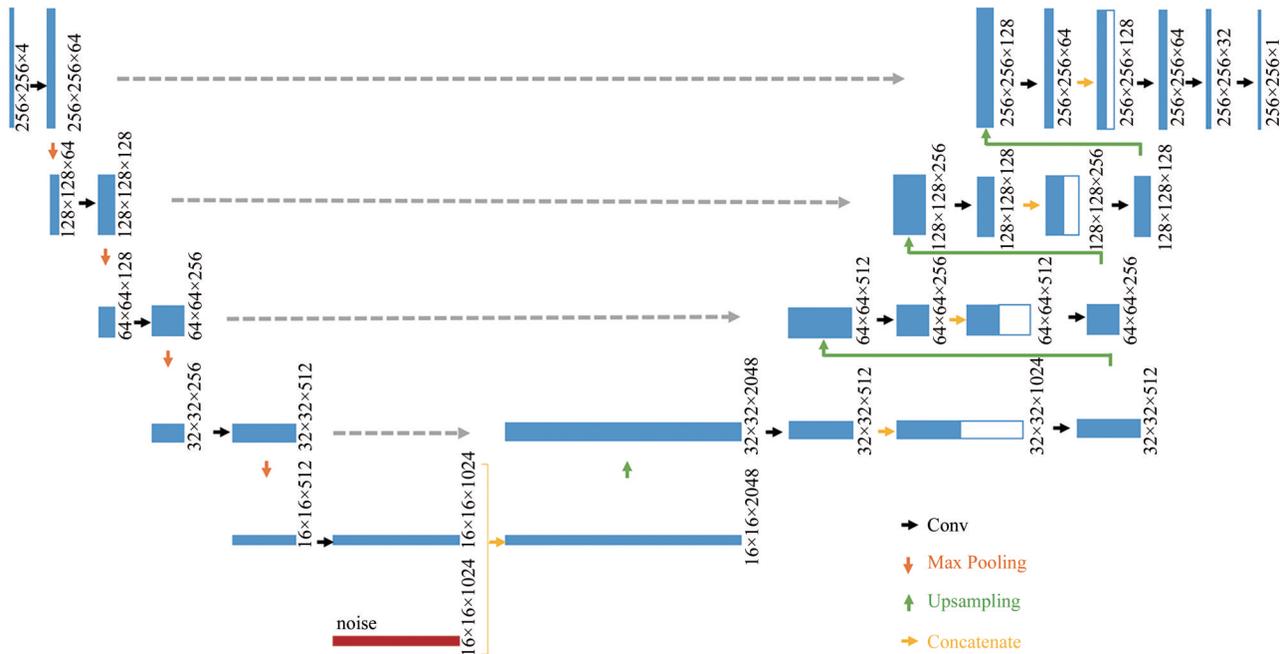


图5 VTGANs生成器网络结构
Fig. 5 VTGANs generator network structure

VTGANs中判别器（Discriminator）用于判别生成器输出的虚拟地形与作为条件输入的地形特征数据是否吻合。为了保持高分辨率和高细节地形的输出，参考PatchGAN设计VTGANs的判别器

（Isola等，2017）。通过将输入的整张图片拆分为多个patch，分别进行差别判断，实现局部图像特征的提取和表征，相比于对整张图片进行判别，它能将局部图像特征和整体图像特征相融合。

3.3 损失函数

在 pix2pix 架构中, Isola 等 (2017) 将 L1 loss (均绝对值误差函数) (式 (2)) 与 CGANs 损失函数 (式 (3)) 结合, 得到了生成效果较为理想的损失函数, 如式 (4) 所示。

$$L_{cGAN} = \mathbb{E}_{c,x}(\log D(c,x)) + \mathbb{E}_c(\log(1 - D(c,G(c)))) \quad (2)$$

$$L_{L1} = \mathbb{E}_{c,x}(\|x - G(c)\|_1) \quad (3)$$

$$G^* = \arg \min_c \max_D L_{cGAN}(G,D) + \lambda L_{L1}(G) \quad (4)$$

由于本文数据量较大, 为达到在训练初期减小梯度变化、保持训练稳定, 在训练后期快速收敛的效果, 故将 L1 loss 与 L2 loss (均方差误差函数) (式 (5)) 相结合形成 smooth L1 loss (式 (6)), 再与 CGANs 损失函数结合后形成新的损失函数, 如式 (7) 所示。

$$L_{L2} = \mathbb{E}_{c,x}((x - G(c))^2) \quad (5)$$

$$L_{smoothL1} = \begin{cases} \mathbb{E}_{c,x}(0.5 \times (x - G(c))^2), & |x - G(c)| < 1 \\ \mathbb{E}_{c,x}(\|x - G(c)\| - 0.5), & \text{其他} \end{cases} \quad (6)$$

$$G^{**} = \arg \min_c \max_D L_{cGAN}(G,D) + \lambda L_{smoothL1}(G) \quad (7)$$

4 模型训练与效果检验

4.1 虚拟地形生成模型训练数据集构建

黄土高原地区经历了两百多万年的黄土搬运和堆积, 在风力沉积和流水侵蚀的共同作用下, 形成了复杂多样且有序分异的地貌形态 (周毅等, 2010)。其中, 丘陵沟壑区沟网密集发育, 具有分形特性, 能够集中反映沟壑丘陵地貌、流水地貌等分形地貌的地形特征, 并且其分形地貌包含较大尺度变化的地形, 适用多种尺度的虚拟地形生成。因此, 本文选择以黄土高原部分地区作为主要研究区域。测绘数据来源于陕西省测绘局, 研究范围如图 6 所示, 数据精度为 5 m, 位深度为 32 位。为保证网络训练效果, 将数据切分为 256×256 像元的地形样本, 共计 170589 个地形样本, 单个样本边长为 1.28 km, 面积为 1.64 km^2 。

从研究区域中可以看出黄土高原存在多种不同风格的地形。为了使模型训练效果收敛, 需要剔除差异较大的地形样本。选取手段及标准表现为 DEM 数据的对比度在不同地貌特征区域的量化结果有最大的差异性, 能够反映不同类型地形样本的区分度, 故根据式 (8) 计算地形样本的 Michelson 对

比度 (余瑞兰等, 2007; 蒋圣等, 2021)。其中, $x_{i\max}$ 和 $x_{i\min}$ 为第 i 个地形样本的最大像素值和最小像素值。剔除包含大量空白高程的地形样本后, 分别抽取不同对比度值的地形样本。从图 7 可以看出, 对比度值大于 0.06 的地形样本能够展示较为逼真的地形特征, 故仅保留对比度值为该范围的地形样本。经过上述操作, 本文共得到 95717 个地形样本数据用于后续数据集制作。为去除噪音, 增强地形样本中的特征细节, 在进行特征图提取前, 对所有地形样本进行高斯平滑降采样和高程值拉伸处理。

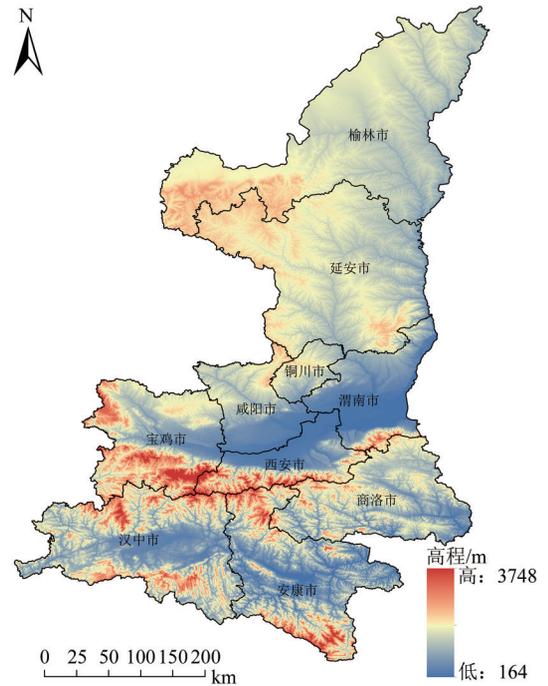


图 6 研究区域样图

Fig. 6 Sample map of study area

$$C_{Mi} = \frac{(x_{i\max} - x_{i\min})}{(x_{i\max} + x_{i\min})} \quad (8)$$

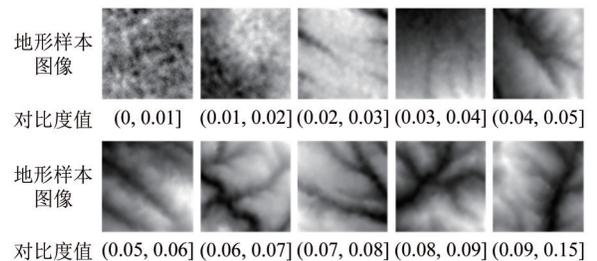


图 7 地形样本图像与对比度值

Fig. 7 Terrain sample image and Michelson contrast value

经过地形特征选择与提取, 能够得到 4 张山谷线、山脊线和正、负地形特征图, 将其二值化特征图以二维数组的形式与对应的地形样本组成数据

对，每个数据对中包含4个256×256像元的地形特征数组作为模型训练的条件输入，1个256×256像元的真实地形高度数据作为模型训练的目标。最终，共生成9万余个数据对，抽取其中的200个作为测试集。部分数据对的可视化效果如图8所示。

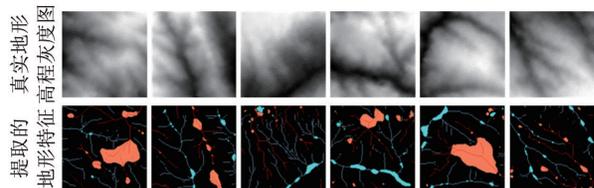


图8 部分数据集效果
Fig. 8 Partial dataset

4.2 网络模型训练

网络训练所用计算机处理器为 Intel Xeon W-2135，内存为32 GB，GPU为NVIDIA RTX 2080，

显存为8 G。基于Python3.7编程实现，深度学习框架为TensorFlow 2.6.0。

网络模型包含生成器G和判别器D。生成器G将输入的地形特征图像映射成目标图像，判别器D判断图片真伪以及是否符合地形特征图的约束，在损失函数和训练次序的共同作用下，实现生成器G参数的最优化（曹仰杰等，2018）。在生成器G中，传统U-Net模型主要针对RGB图像的生成问题，因此输入与输出均有3个波段，而本文的数据输入为256×256×4的地形特征图，输出为256×256×1的DEM数据，故调整第一层与最后一层的卷积参数，减少上采样过程中的1个Zero Padding层。在判别器D中，本文设定的单个patch大小为16，故最后生成一个16×16×1的张量，其中各项的均值表示判别器的判定结果。样本数据集网络训练过程如图9所示。

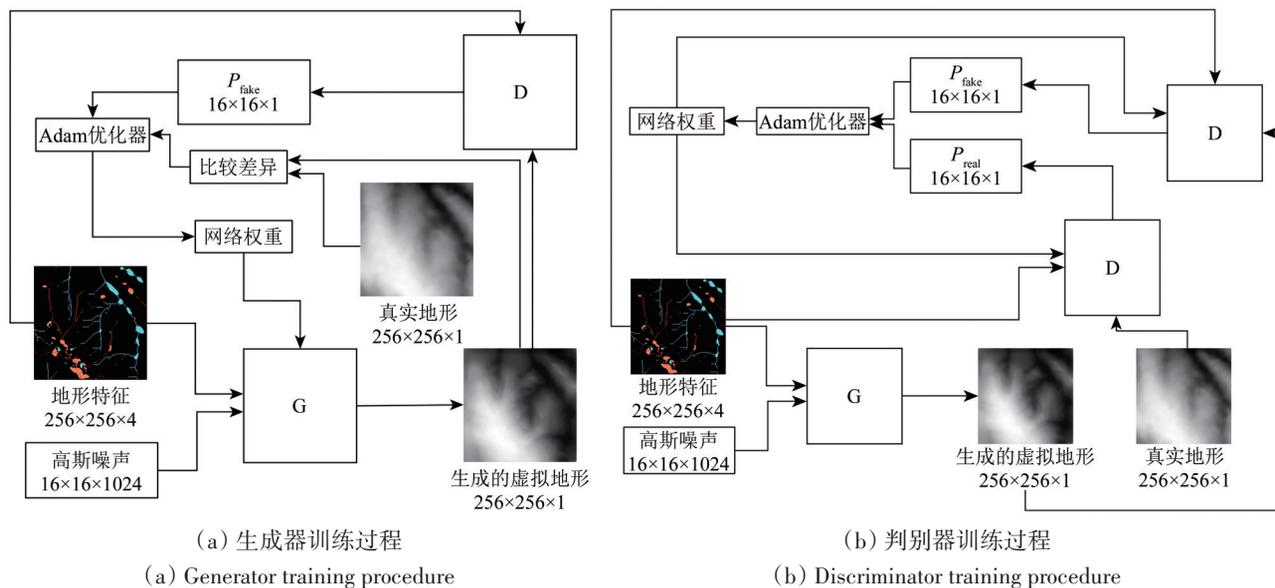


图9 网络训练过程
Fig. 9 Network training process

4.3 虚拟地形生成效果检验

结合前人研究方法，本文选取4个模型（表1）进行训练并对比其在测试集上的生成效果，发现4个模型生成的虚拟地形虽均符合地形特征的描述，但却存在差别（图10）。

为定量评价模型的生成效果，根据式（9）分别计算测试集中真实地形样本与生成地形图片的多尺度结构相似性指标SSIM（Structural Similarity Index）。对于整幅图像，计算每个像素SSIM的平

均值。该值能够评价两幅图像在亮度、对比度和结构的差异性，当两幅图像完全相等时，SSIM值等于1。取200个地形样本，计算SSIM平均值，结果保留3位小数，如表2所示。

$$SSIM(x, y) = \frac{2\mu_x\mu_y + C_1}{\mu_x^2 + \mu_y^2 + C_1} \times \frac{2\sigma_x\sigma_y + C_2}{\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + C_2} \times \frac{\sigma_{xy} + C_3}{\sigma_x\sigma_y + C_3} \quad (9)$$

式中， μ_x 、 μ_y 分别为x和y的平均值， σ_x 、 σ_y 分别为x和y的标准差， σ_{xy} 为x和y的协方差。

表1 模型描述
Table 1 Model description

模型编号	模型结构	Loss	输入噪声
I	pix2pix	L1 loss	×
II	pix2pix	Smooth L1 loss	×
III	VTGANs	L1 loss	√
IV	VTGANs	Smooth L1 loss	√

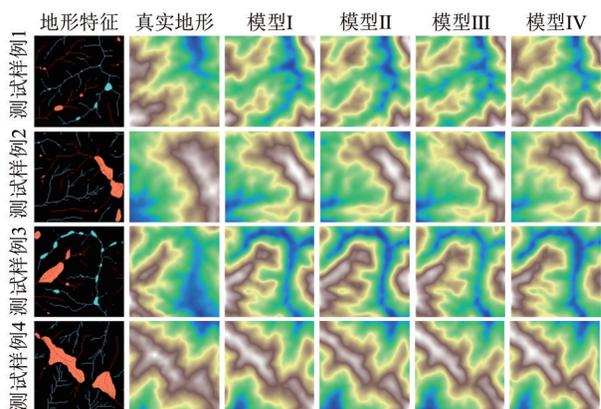


图10 根据测试集地形特征生成的虚拟地形效果对比
Fig. 10 Comparison of virtual terrain effects generated based on test set terrain features

表2 地形生成模型生成效果定量对比
Table 2 Quantitative comparison of terrain generation model generation effect

模型编号	平均 SSIM
I	0.873
II	0.872
III	0.881
IV	0.886

比较模型 I 与 II、III 与 IV 生成图像与原图像的多尺度结构相似性指标,发现替换损失函数并不会影响模型生成图像效果。比较 I 与 II、III 与 IV 生成图像与原图像的多尺度结构相似性指标,在生成器输入包含噪声时,模型对训练集的拟合

效果相对较弱,但对测试集的生成效果较好。由此可以看出改善后模型能够提高手绘草图生成图像的真实度,使其更加贴合真实世界的地形。

5 基于手绘特征草图的虚拟地形生成

5.1 虚拟地形快速生成

VTGANs 虚拟地形生成模型可以支持用户根据实际或虚构场景抽象地描绘地形特征类型与地势走向,根据手绘特征草图得到较高还原度的虚拟地形。草图绘制界面可以支持用户分层绘制山谷线、山脊线和正、负地形特征(山谷线和山脊线为线特征,正、负地形为面特征)。为便于用户绘制,界面中各个图层的线宽和颜色均为固定(图11)。

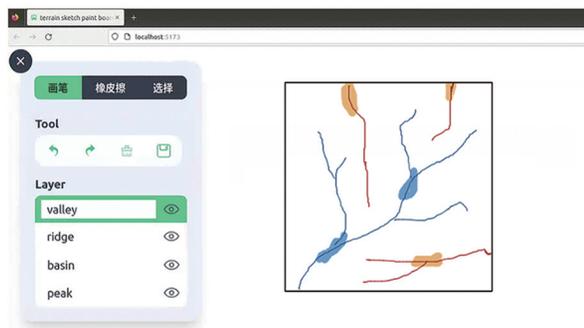


图11 手绘草图界面
Fig. 11 Hand-drawn sketch interface

将绘制的特征草图分图层输入已训练的虚拟地形生成模型中,生成虚拟地形高度图,并进行三维模型渲染后可以看出,生成的虚拟地形基本符合描述的地形类型、地形走势和地势起伏(图12)。

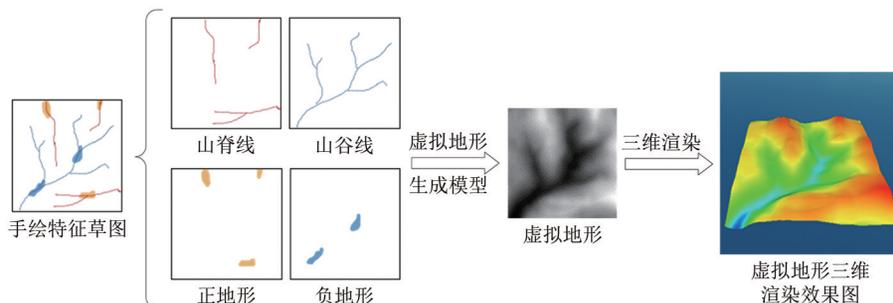


图12 根据手绘特征草图生成虚拟地形过程
Fig. 12 The process of generating virtual terrain from hand-drawn sketches

在手绘特征草图过于稀疏时，为对比本文方法与 Guérin 等（2017）方法生成的虚拟地形在地形细节的真实性效果，绘制了如图 13 左图所示的特征草图，对比放大的三维地形，可以发现本文方法生成的地形拥有更加真实的地表细节。

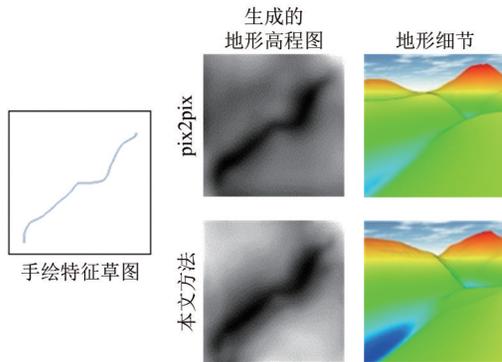


图 13 由稀疏手绘草图的虚拟地形生成效果
Fig. 13 Virtual terrain generation effect from sparse hand-drawn sketch

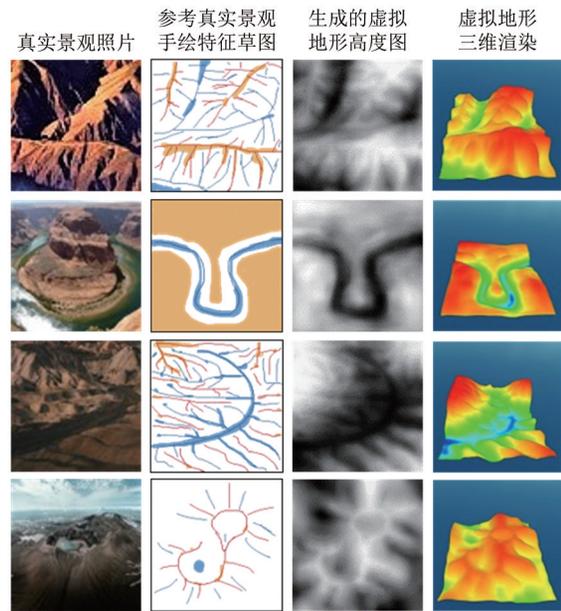


图 14 参考真实场景照片生成的虚拟地形效果
Fig. 14 Virtual terrain effect generated by reference to real scene photos

5.2 手绘特征草图虚拟地形生成实践

虚拟地理实验是虚拟地理环境在地理学研究中的应用，能够实现一些在现实条件中不可能实施的实验，使可重复的模拟实验成为可能（林琿等，2009）。本文提出的方法可以根据手绘地形特征草图实现真实或意象场景的具象化，为虚拟地理实验提供地形数据。如图 14 所示，用户可参考真实景观照片绘制地形特征草图，快速生成虚拟地形高度图，搭建与真实场景类似的虚拟场景。

同时，本文方法也可应用于地质、地貌学等学科的虚拟地理实验中。其中，地貌学是研究地表形态及其成因的科学，成因是本质，形态是成因的反映（周成虎等，2009），而地形特征可以一定程度上描述地形地貌的形态。为展现本文方法生成的虚拟地形符合自然世界地形形成的机理，使用地貌演化过程中各个阶段的地形特征，构建对应阶段的虚拟地形，渲染展示，完成地貌演化过程的示范。如图 15 所示，展示了流水侵蚀的演化过程。

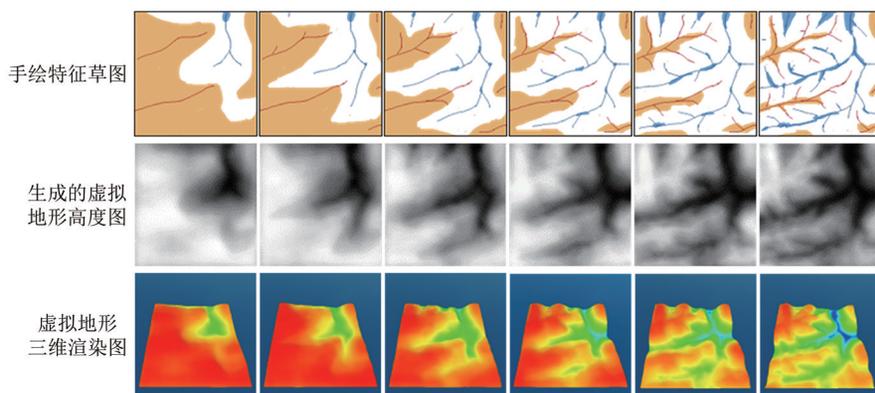


图 15 地貌演化过程演示示范
Fig.15 Demonstration of geomorphic evolution process

6 结论

本文提出基于改进 GAN 的手绘特征草图虚拟

地形生成方法，在网络模型 VTGANs、黄土高原 DEM 与提取的地形特征数据集、抽象表达地形特征的手绘草图等三方面支持用户使用手绘特征草

图生成虚拟地形 DEM 表达意境地图。本文提出的地形特征提取方法, 构建了接近用户手绘特征草图效果的数据集, 使训练模型具有更强的泛化能力。实验结果表明, 本文方法能够根据用户手绘地形特征草图生成完整且合理的虚拟地形 DEM 数据, 尤其在稀疏手绘草图输入时, 生成的虚拟地形拥有较为真实的地表细节。

目前, 生成的虚拟地形特征和尺寸仍受限于数据集样本, 且用户表达意境地图的交互形式仅为二维手绘草图, 导致其存在生成的地貌类型较为单一等问题。未来可使用多种地貌类型的数据集、集成多种交互模式、运用多种生成式人工智能 AIGC (AI Generated Content) 技术, 结合元宇宙的虚实空间交互于融合, 将意境地图表达从二维平面拓展到三维场景中, 探讨生成多特征、多尺寸虚拟地形的可能性, 并在地形高度图生成的基础上增加植被覆盖、生态特征等多种属性图层的自动生成, 为地理元宇宙和数字孪生虚拟地理环境场景的快速构建提供解决方案。

参考文献 (References)

- Barnes R, Lehman C and Mulla D. 2014. An efficient assignment of drainage direction over flat surfaces in raster digital elevation models. *Computers and Geosciences*, 62: 128-135 [DOI: 10.1016/j.cageo.2013.01.009]
- Cao Y J, Jia L L, Chen Y X, Lin N and Li X X. 2018. Review of computer vision based on generative adversarial networks. *Journal of Image and Graphics*, 23(10): 1433-1449 (曹仰杰, 贾丽丽, 陈永霞, 林楠, 李学相. 2018. 生成式对抗网络及其计算机视觉应用研究综述. *中国图象图形学报*, 23(10): 1433-1449) [DOI: 10.11834/jig.180103]
- Gregory D, Johnston R, Pratt G, Watts M J and Whatmore S. 2009. *The Dictionary of Human Geography: Mental Maps/Cognitive Maps*. 5th ed. Hoboken: Wiley-Blackwell
- Guan W J, Cao B, Wang X Y and Ma F Y. 2017. Comparison of river information extraction methods. *Yellow River*, 39(2): 51-55 (管伟瑾, 曹泊, 王晓艳, 马芬艳. 2017. 河流信息提取方法比较. *人民黄河*, 39(2): 51-55) [DOI: 10.3969/j.issn.1000-1379.2017.02.014]
- Guérin É, Digne J, Galin É, Peytavié A, Wolf C, Benes B and Martinez B. 2017. Interactive example-based terrain authoring with conditional generative adversarial networks. *ACM Transactions on Graphics*, 36(6): 228 [DOI: 10.1145/3130800.3130804]
- Isola P, Zhu J Y, Zhou T H and Efros A A. 2017. Image-to-image translation with conditional adversarial networks//Proceedings of the 2017 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Honolulu: IEEE: 5967-5976 [DOI: 10.1109/CVPR.2017.632]
- Jiang S, Tang G A, Yang X, Xiong L Y and Qian C Y. 2021. Conceptual model of terrain texture in Loess Plateau based on DEM. *Journal of Geo-Information Science*, 23(6): 959-968 (蒋圣, 汤国安, 杨昕, 熊礼阳, 钱程扬. 2021. 基于DEM的黄土高原地形纹理概念模型. *地球信息科学学报*, 23(6): 959-968) [DOI: 10.12082/dqxxkx.2021.200411]
- Jing K. 1986. A study on gully erosion on the Loess Plateau. *Scientia Geographica Sinica*, 6(4): 340-347 (景可. 1986. 黄土高原沟谷侵蚀研究. *地理科学*, 6(4): 340-347) [DOI: 10.13249/j.cnki.sgs.1986.04.340]
- Lin H, Gong J H and Shi J J. 2003. From maps to GIS and VGE—A discussion on the evolution of the geographic language. *Geography and Geo-Information Science*, 19(4): 18-23 (林琿, 龚建华, 施晶晶. 2003. 从地图到地理信息系统与虚拟地理环境——试论地理学语言的演变. *地理与地理信息科学*, 19(4): 18-23) [DOI: 10.3969/j.issn.1672-0504.2003.04.005]
- Lin H, Hu M Y, Chen M, Zhang F, You L and Chen Y T. 2020. Cognitive transformation from geographic information system to virtual geographic environments. *Journal of Geo-Information Science*, 22(4): 662-672 (林琿, 胡明远, 陈旻, 张帆, 游兰, 陈宇婷. 2020. 从地理信息系统到虚拟地理环境的认知转变. *地球信息科学学报*, 22(4): 662-672) [DOI: 10.12082/dqxxkx.2020.200048]
- Lin H, Huang F R, Lu X J, Hu M Y, Xu B L and Wu L. 2010. Preliminary study on virtual geographic environment cognition and representation. *Journal of Remote Sensing (in Chinese)*, 14(4): 822-838 (林琿, 黄凤茹, 鲁学军, 胡明远, 徐丙立, 武磊. 2010. 虚拟地理环境认知与表达研究初步. *遥感学报*, 14(4): 822-838) [DOI: 10.11834/jrs.20100415]
- Lin H, Huang F R and Lü G N. 2009. Development of virtual geographic environments and the new initiative in experimental geography. *Acta Geographica Sinica*, 64(1): 7-20 (林琿, 黄凤茹, 闰国年. 2009. 虚拟地理环境研究的兴起与实验地理学新方向. *地理学报*, 64(1): 7-20) [DOI: 10.3321/j.issn:0375-5444.2009.01.002]
- Liu H and Xue M. 2021. Exploring the use of virtual geographic environments for geo-spatial cognition research. *National Remote Sensing Bulletin*, 25(10): 2027-2039 (刘浩, 薛梅. 2021. 虚拟地理环境下的地理空间认知初步探索. *遥感学报*, 25(10): 2027-2039) [DOI: 10.11834/jrs.20210460]
- Mirza M and Osindero S. 2014. Conditional generative adversarial nets. arXiv:1411.1784 [DOI: 10.48550/arXiv.1411.1784]
- Ronneberger O, Fischer P and Brox T. 2015. U-Net: convolutional networks for biomedical image segmentation. arXiv: 1505.04597 [DOI: 10.48550/arXiv.1505.04597]
- Tang G A, Na J M and Cheng W M. 2017. Progress of digital terrain analysis on regional geomorphology in China. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 46(10): 1570-1591 (汤国安, 那嘉明, 程维明. 2017. 我国区域地貌数字地形分析研究进展. *测绘学报*, 46(10): 1570-1591) [DOI: 10.11947/j.AGCS.2017.20170388]
- Yu R L, Liu Y and Wang A. 2007. Contrast of interference stripes in optical fiber Michelson interferometer. *Journal of Atmospheric and Environmental Optics*, 2(3): 231-235 (余瑞兰, 刘勇, 王安. 2007. 光纤 Michelson 干涉仪干涉条纹对比度的研究. *大气与环境光光学*

- 报, 2(3): 231-235 [DOI: 10.3969/j.issn.1673-6141.2007.03.016]
- Zhou C H, Cheng W M, Qian J K, Li B Y and Zhang B P. 2009. Research on the classification system of digital land geomorphology of 1: 1000 000 in China. *Journal of Geo-Information Science*, 11(6): 707-724 (周成虎, 程维明, 钱金凯, 李炳元, 张百平. 2009. 中国陆地 1:100 万数字地貌分类体系研究. *地球信息科学学报*, 11(6): 707-724) [DOI: 10.3969/j.issn.1560-8999.2009.06.006]
- Zhou H, Sun J, Turk G and Rehg J M. 2007. Terrain synthesis from digital elevation models. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 13(4): 834-848 [DOI: 10.1109/TVCG.2007.1027]
- Zhou Y, Tang G A, Wang C, Xiao C C, Dong Y F and Sun J L. 2010. Automatic segmentation of loess positive and negative terrains based on high resolution grid DEMs. *Scientia Geographica Sinica*, 30(2): 261-266 (周毅, 汤国安, 王春, 肖晨超, 董有福, 孙京禄. 2010. 基于高分辨率DEM的黄土地貌正负地形自动分割技术研究. *地理科学*, 30(2): 261-266) [DOI: 10.13249/j.cnki.sgs.2010.02.003]

Generation method of hand-drawn feature sketch virtual terrain based on improved generative adversarial network

ZHANG Xiaoyuan, CHEN Bin

School of Earth and Space Sciences, Peking University, Beijing 100871, China

Abstract: The 3D virtual terrain generation is currently used in geography teaching and setting up relevant virtual scenes according to the teaching content, which can visually display the verification experimental conditions and results and enhance the universality of virtual geography experiments. In the field of digital twin smart city, traffic, and water simulation, constructing virtual terrain according to the real terrain can provide the basic environment for subsequent development and experiments. In military simulation, it can quickly build beyond the real scenes of extreme training environment, which has a key role in improving military training and enhancing combat capabilities. Hand-drawn feature sketches can express 3D virtual terrain under human subjective perception. Therefore, how to use hand-drawn feature sketches to build 3D terrain environment quickly and generate realistic virtual geographic environment is a hot spot and difficult point for the creation and development of geographic metaverse with virtual geographic environment as the core in the future. Although the traditional method of generating 3D virtual terrain provides an important reference for image cross-domain generation from hand-drawn feature sketch to virtual terrain, problems such as insufficient realism of the generated terrain remain. Especially when the terrain feature outline is too sparse, the generated terrain will have duplicate terrain blocks and grid artifacts. On this basis, a hand-drawn feature sketch virtual terrain generation method with improved generative adversarial network is proposed. The model is based on extracted data samples and hand-drawn sketch characteristics, and the input terrain feature information is involved in the sampling of each layer by improving the generator U-Net network, which enhances the control role of terrain features in the invisible space, reduces the possibility of model collapse, increases the random noise input, and improves the realism of the generated terrain, especially the detail when the terrain feature elements in the sketch are sparse. L1 loss (mean absolute value error function) and L2 loss (mean variance error function) are combined to form smooth L1 loss, and then optimized with CGAN loss function to form a new generator loss function to improve the stability and efficiency of model training. The Digital Elevation Model (DEM) data of some areas of the Loess Plateau with high accuracy is selected to produce data. The DEM data with high accuracy are selected and used for model training to compare and evaluate the terrain generation enhancement effect quantitatively before and after model improvement. Finally, the model inference process from hand-drawn feature sketch to virtual terrain is completely constructed. The experimental results show the improved virtual terrain generation model with the Loess Plateau terrain data can represent the hand-drawn feature sketch well, and the generated terrain conforms to the distribution and orientation of the terrain features described in the sketch, especially in the case of sparse sketch, and the generated terrain has high realistic surface details. This model is applied to the real natural landscape display and terrain evolution, and it can meet the user's needs to obtain the virtual terrain with high realistic feeling after inputting the hand-drawn terrain feature sketch. This improved model proposed in this paper has good prospects for 3D terrain modeling and editing.

Key words: remote sensing, 3D virtual terrain, CGANs, hand-drawn feature sketch, DEM

Supported by National Key Research and Development Program of China (No. 2021YFF0500900); National Natural Science Foundation of China (No. 41771442, 41271402)