

数字孪生多尺度三维建模及场景构建技术研究

韦炜初

广西壮族自治区自然资源遥感院

摘要：随着数字化进程的快速发展，数字孪生技术已广泛应用于各个领域，是经济社会数字化、网络化、智能化转型的关键技术。本文主要研究分析复杂数字孪生场景下不同尺度的三维建模方法，实现多层次、多尺度模型表达数字孪生场景，并探讨数字孪生三维建模面临的挑战和趋势。

关键词：三维建模；数字孪生；多尺度

【DOI】 10.12254/j.issn.2096-6539.2024.07.118

一、引言

数字孪生技术是当前数字化进程中的重要技术之一，它通过建立物理对象或系统的数字模型，实现对其的实时监控、预测和优化。随着数字化进程的快速发展，数字孪生技术的应用范围也在不断扩大，成为经济社会数字化、网络化、智能化转型的关键技术之一。本文主要研究当前数字孪生三维重建技术，针对复杂数字孪生场景下不同尺度物理实体，总结出多尺度全要素建模及场景构建方法，并分析探讨未来数字孪生三维重建面临的挑战和趋势。

二、数字孪生与三维建模

传统的gis三维应用是一个抽象的静态空间，仅提供业务有需求的必要空间要素，对空间数据的准确性还原非常严谨，但是对视觉效果没有太大的需求和实现，很多时候仅提供基础的光照模型，距离真实感还有很大距离。数字孪生场景是一个动态的真实物理世界映射，除了业务直接相关的空间要素，其他真实世界的要素也复刻完备，空间数据细节通常远高于传统gis应用，数字孪生场景中的实体，如车辆、人群、天气状况等，往往都是受真实数据驱动的动态实体。数字孪生场景与传统gis应用对比，对于模型的精度和艺术表现的要求提高了很多，包括几何体的精细程度、模型表面材质的金属特性、粗糙特性、表面凹凸细节等等都有细致刻画要求，以便“基于物理渲染”的三维引擎进行真实还原，

尽量复刻逼真的空间场景。

三维建模是将采集到的数据转化为三维模型的过程，是数字孪生项目中的一大核心步骤。在实际应用中，三维建模技术对数字孪生的发展和应用有着非常重要的作用。通过三维建模技术创建的“孪生模型”能够精细还原物理实体的纹理细节，实现照片级细节显示精度，实现几何结构和细节与物理实体保持一致。复杂的数字孪生场景需要对大量不同尺度的物理实体进行建模，实现场景全要素多尺度建模，并将这些不同尺度的模型融合为一个综合的系统级模型，构建与现实的一比一映射。通过构建全空间的三维数据底板，实现数字空间与物理空间的精准映射，为数字孪生可视化展现、智能计算分析、仿真模拟和智能决策等提供数据基础，支撑数字孪生各项应用。

三、全空间多尺度建模

在广域数字孪生场景中，需要建模和表达不同尺度或规模的实体，实现场景从宏观到微观的高效构建和精准还原。每个尺度或规模的实体都有其独特的属性和行为，因此需要使用适当的建模方法和技术来进行表达。通过多层次建模表达的实现，可以高效地构建广域数字孪生场景，并实现精准还原和实时监控。本文提出的全空间多尺度建模方法包括航天对地观测、无人机倾斜摄影、激光扫描建模、人工建模、半自动建模及设备元素精建模等多种技术手段，技术方案图如图1所示。这些技术可以实现对地球表面和内部的各种要素进行多尺度、全方位的建模和表达，包括地形、地貌、建筑物、植被、水系、交通等自然和人文要素。这些技术手段的结合可以实现多尺度、全方位的建模和表达，为城市规划、环境保护、资源管理等领域数字孪生项目提供精准的地理信息数据支持。

(一) 航天对地观测

航天对地观测技术能够快速、实时、动态地获取不同尺度和精度的大范围地表信息，特别适用于获取大



图1 全空间多尺度建模方案

面积城市地表地物地形地貌信息，反映大范围城市地形起伏特征，三维地形的构建一般需要数字高程模型（DEM）及数字正射影像（DOM），数字高程模型用于描述地形起伏状态，数字正射影像用于描述真实地物情况，在DEM地形框架基础上，与高分辨率DOM进行叠加，可快速构建地形级实景三维，为数字孪生项目提供数字空间底座。

（二）无人机倾斜摄影

倾斜摄影测量是指使用无人机从多个角度（如垂直、倾斜等）采集影像数据，以获取完整准确的纹理数据和定位信息。这种技术能够弥补传统三维建模技术的缺陷，成为大场景三维建模的重要选择之一。

倾斜摄影平台搭载于低空飞行器，可获取厘米级高分辨率的垂直和倾斜影像，从多个不同的角度采集影像，能够获取地物侧面更加真实丰富的纹理信息，弥补了正射影像只能获取地物顶面纹理的不足。通过垂直与倾斜影像的全自动联合空三加密，无需人工干预，即可全自动化纹理映射，并构建三维模型。总的来说，倾斜摄影测量是一种具有高分辨率、能够获取丰富地物纹理信息并高效构建三维模型的技术，但是倾斜摄影技术也具有一定的局限性，该技术采用可见光进行测量，对天气要求较高，并且对密集植被下的地形无能为力，对小物体的建模能力也有限。

（三）激光雷达扫描

三维激光扫描技术利用激光测距的原理，通过记录被测物体表面大量的密集点的三维坐标、反射率和纹理等信息，可快速复建出被测目标的三维模型，越密集的点云创建的模型越精确。三维激光扫描技术能快速获取地形的立体信息，既缩短了野外工作时间，又提高了数据采集效率，能够实现实时采集数据。三维激光扫描仪还具有很强的抗干扰能力，不受天气、温度、湿度等外部环境因素的影响，可以进行全天不间断的实时动态观测。

（四）人工建模

手工建模是一种常用的建模技术，通过人工方式使用三维重建技术来对现实世界中的物体或场景进行高精度的数字化复原或建模。传统三维建模通常使用3dsMax、Sketchup、c4d、maya等建模软件，基于CAD二维矢量图、影像数据或者手工拍摄的照片估算建筑物的轮廓和高度信息进行人工建模。随着新型测绘技术的发展，综合运用无人机倾斜摄影、背包式激光雷达、相机等多种技术手段，可实现对区域室内外环境进行快速、全面的数据获取，得到精确的地理位置、物体形状信息，借助三维建模技术对建筑、道路、设施设备、管线等全要素进行部件级精细化建模。这种技术可以实现对物体或场景的形状、大小、颜色、纹理等各方面的精细描绘，达到较高的逼真度和还原度。

但同时人工三维重建的制作过程相对复杂，成本较高。这主要是因为人工三维重建需要大量的人工参与，每个环节都需要专业知识和技能，人工三维重建通常适用于小范围重点区域、建筑物、精细设备等，需要高精度的重建结果，并且能够承担相应的成本。

（五）半自动建模

在建模过程中也可以借助参数化建模、半自动建模插件等工具提高效率。参数化建模是一种基于参数的设计方法，它可以通过调整参数来改变模型的形状、大小等特征。这种方法可以大大提高设计效率，因为一旦建立了参数化模型，就可以通过修改参数来快速生成新的设计方案。在三维重建中，参数化建模可以用来建立建筑、机械零件等复杂物体的模型，通过调整参数可以实现模型的快速修改和优化，如CityEngine软件可以在现有二维数据基础上进行参数化控制，快速创建三维模型场景，通过规则快速调用GIS二维数据中的属性数据新型自动化批量建模。这种高效、参数化的建模方式尤其适合大规模城市的三维建模需求。

（六）设备元素精建模

面向复杂设施设备、文物等的高精度建模方法，通常采用手持式激光、结构光等非接触光学扫描的方式进行。通过将激光或结构光投射到空间中，采集其反射的光学特征，获取测量对象的三维点云，基于点云构建简易三维模型，通过纹理贴图及模型优化，生成高精度设备元素级三维模型。

这种建模手段借助于光学扫描仪，通过对目标对象进行不接触扫描，便可通过处理软件自动生成点云数据和初步三维模型，人工干预少，自动化水平高。同时，目标对象要素相对位置准确、模型精度和精细度高，甚至可以准确构建螺丝螺纹等细节特征。这种面向设备、设施的高精度建模方法具有高自动化、高精度、高细节特征捕捉能力的优点，但同时也存在数据量大、建设成本较高的限制。

四、场景构建

数字孪生场景建设应按照不同的业务需求不同应用场景定制不同要素、不同等级的三维场景。搭建基础的数字孪生场景底座，包含地形地貌、行政区划、河流水体、植被、道路交通设施、建筑、管线、设施设备、室内模型等要素信息，可实现多源多尺度场景数据融合。数字孪生场景建设应满足后期实现数据可视化图表呈现，物理实体三维可视化呈现，支持实时信息交互与深度融合功能，实现对模型资产的查找和定位，设备资产信息的查询和统计，实现在数字孪生环境中进行安防、消防、设施等实时监控、维护、远程控制等功能。本文根据不同需求不同尺度将三维场景分为地形级、城市级、园区级三维场景。

（一）地形级三维场景

地形级实景三维场景主要表现城乡大区域地形地貌。从高空视角观看，能够直观展现山川河流、村镇分布、城市形态。通过收集已有高分辨率影像（DOM）和数字高程模型（DEM）成果，三维地形数据由高分辨率影像叠加数字高程模型构成，这种三维数据生产效率相对较高，在数据量上相对较低，适合大范围场景三维项目采用。

（二）城市级三维场景

城市级实景三维场景主要表现一定区域的城市风貌、地形地物。从低空视角观看，能够直观展现居民地、工矿建（构）筑物、交通设施、水系、植被、地貌等。该层级的实景三维场景一般采用倾斜航空摄影方式

获取影像数据或激光点云数据,然后使用倾斜三维自动化建模软件进行数据处理,并对自动化生成的三维模型进行修饰,消除平静水面等导致的模型结构空洞、变形,以及大型悬浮物等,形成城市级实景三维场景。

还有一种方法是使用半自动化建模软件,如CityEngine结合主流建模软件SketchUp、3Dmax实现快速创建还原城市级三维场景。将作业内具有独立特征的地物通过SketchUp实现手工快速建模,而对于那些具有相同或相似结构的地物群则通过编写CityEngineCGA规则实现了批量建模,从而避免了大量的重复性手工劳动,最后将SketchUp模型以静态模型的方式导入到CityEngine创建的三维场景中并与其融合,可快速实现了作业区内符合实际情况的三维场景的建立。

(三) 园区级场景构建

园区级三维场景包含精细化地形地貌、路网、行政区划、河流水体、道路两侧植被、道路精细外观等要素信息,以三维实景形式,高精度表现园区范围的场景外观、状态,目标位置、数据分布等业务要素,适用于园区级孪生态势监测。园区整体大场景三维建模采用倾斜摄影的方式,快速搭建园区及周边范围内的实景三维模型。

园区内重要区域、建筑物、精细设备、细小构件、室内重点区域等主要采用精细化单体建模,这种建模方式可以更加准确地反映这些区域的实际情况。利用无人机倾斜摄影技术对重要区域进行航摄,可以获取更全面和准确的地形数据,同时通过全景相机激光扫描生成点云的方法,可以获取建筑内部结构和室内组成元素等数据的真实比例与相对位置信息。这些数据可以为精细化建模提供更加准确的基础数据。另外,通过获取建筑施工图也可以得到建筑内部结构信息,这对于建筑物的精细化建模非常重要。基于以上数据,使用3dMax、C4D、SketchUp等三维建模软件可以对建筑物、室内主体框架、基础设施和细小部件进行精细化建模。

在建模过程中,需要注重细节和精度,尽可能地还原这些区域的实际情况。同时,还需要根据园区的实际情况和需求,对模型进行优化和调整,以满足园区的数字化管理和可视化分析需求。

对于园区内结构复杂的物体、不规则异形高精密度仪器设备,使用手工的方法耗时耗力,且模型重建精度难以保障。使用手持三维激光扫描仪、结构光三维扫描等设备进行三维数据重构是一种有效的解决方案。对于园区地下管线,需要收集地下管线的设计施工图纸,这些图纸通常包含了管线的位置、走向、属性等信息,也可以采用测量技术现场勘探调查园区地下管线位置、管线属性、间距、权属单位信息。这些信息可以通过专业的测量设备进行测量和记录,进而为建模提供准确的数据。最后,使用如Revit等地下管线建模软件进行建模,可以根据实际测量的数据进行三维建模,并根据实际情况合理设置参数。

五、数字孪生建模关键技术挑战

(一) 多源数据融合与集成

数字孪生模型需要覆盖从微观到宏观的多尺度领域,包括微观层面的组件、部件、系统等,以及宏观层面的设施、工厂、城市等。这需要建立多尺度、多领域

之间的关联和映射关系,实现多尺度数据的融合和模型的整合。为了构建一个完整、准确的数字孪生模型,还需要将实景三维数据、机理模型和专家经验知识进行有机的集成融合。这种集成不仅涉及技术层面的融合,还涉及数据层面、知识层面和应用层面的融合。

(二) 实时数据处理与反馈

数字孪生模型需要高精度几何建模以实现逼真的可视化效果,同时还需要考虑几何建模过程中的计算效率问题。数字孪生模型需要实时获取物理实体的状态数据,并进行快速处理和反馈。这要求模型具备高效的数据处理能力、快速的计算和分析能力,以及实时的控制和决策能力。

(三) 数据质量与数据安全问题

数字孪生技术对数据的质量和安全性有着极高的要求。数据质量主要包括数据的准确性、完整性、一致性和时效性。需要采用先进的数据采集设备和方法,以确保数据的可靠性。此外,对数据进行清洗、校验和去重等预处理操作,也是确保数据质量的重要措施。在数据安全方面,应加强数据的访问控制、防火墙设置以及数据加密等技术手段,以防止数据泄漏、篡改或损坏。同时,需要建立健全的数据安全管理制度,确保数据在存储、传输和使用过程中的安全性。

(四) 技术集成与标准化问题

数字孪生技术的发展涉及多个领域的技术集成,包括数据采集、数据处理、云计算、模型构建与仿真等。各领域的技术发展水平和应用场景各不相同,这使得技术集成和标准化面临很大的挑战。为解决这一问题,企业、政府部门和行业协会需要共同参与制定统一的技术标准和规范,以降低技术集成的难度。此外,推广开放式架构和开源技术也有助于提高技术的互操作性,促进各领域技术的融合发展。

六、结论

针对复杂数字孪生场景下不同尺度物理实体,本文提出了多尺度全要素建模方法,实现多源异构数据的天空地协同采集和处理,支持从宏观到微观的多尺度数字化融合,实现全要素的精准数字孪生映射。未来随着数字化技术的不断发展,数字孪生全空间多尺度三维建模技术将会得到更广泛的应用和发展,同时还需要不断研究和探索新的技术和方法,提高建模精度和效率,实现更加智能化和自动化的三维建模。

参考文献

- [1] 陈若飞,李江川,马燕.基于数字孪生技术的明珠湾智慧城市信息平台建设实践[J].自然资源信息化,2022(2):63-68.
- [2] 梅杰.城市数字转型中的主体压迫与伦理困境[J].社会科学文摘,2021(9):37-39.
- [3] “洞见”数字孪生城市[N].中国建设报,2019-12-30(6).
- [4] 刘棠丽,彭革非,刘文.新型智慧城市实践推动智慧社会可持续发展[J].信息技术与标准化,2019(8):13-18.
- [5] 崔士勇.借力新兴技术,赋能新型智慧城市核心领域[J].软件和集成电路,2019(1):42-43.