

地下矿井巷施工及采矿生产过程的 4D 时空变化动态模拟技术

顾清华¹, 卢才武¹, 冯治东², 白春妮¹

(1. 西安建筑科技大学管理学院, 陕西 西安 710055; 2. 榆林学院信息工程学院, 陕西 榆林 719000)

摘要: 井巷施工及采矿生产的 4D 时空动态过程模拟建模是重现施工及采矿活动历史状态、跟踪当前采矿活动状态变化、预测未来施工及开采进度的关键技术。本文首先根据井巷施工及采矿生产数据对象特点的不同, 将研究对象划分为点、线、面、体四类, 利用 Oracle Spatial 提供的对象-关系模型, 构建了适用于描述地下矿施工及采矿 4D 时空变化的动态数据模型, 然后分别设计了四类对象的时空变化数据结构, 并对 4D 时空数据的动态查询进行了对比优化, 最后通过实例提出了进行地下矿井巷施工及采矿生产过程 4D 时空变化动态模拟的具体步骤和方法。实例表明: 本文提出的地下矿井巷施工及采矿生产过程的时空变化动态模拟技术, 具有空间数据格式统一、查询分析效率高、实用性强的优点, 为井巷施工及采矿生产的 4D 可视化奠定了基础。

关键词: 井巷施工; 采矿生产; 4D 时空; 动态模拟

中图分类号: TU459.9

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2016)04-0610-07

The dynamic simulation technology of underground mine construction and mining production based on 4D spatial and temporal data

GU Qinghua¹, LU Caiwu¹, FENG Zhidong², Bai Chunni¹

(1. School of Management, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China;

2. School of Information Engineering, Yulin University, Yulin 719000, China)

Abstract: Simulation of 4D spatio-temporal dynamic model of roadway construction and mining production is very important in 4D. It is a key technique to show the history of construction and mining, track mining production activities and predict future construction and mining schedule. In this paper, according to different characteristics of mining data, four different data objects are performed, i.e. points, lines, surfaces and bodies. Using the Object-Relation model of Oracle Spatial, the 4D spatio-temporal data object model is designed. There are four different spatio-temporal data structures from four objects. The query of 4D spatio-temporal data is studied and optimized. Finally, an example is put forward to give the steps and methods to realize the simulation of roadway construction and mining production in underground mine. Examples show that the dynamic simulation technology of underground construction and mining production based on 4D spatial and temporal data has advantages of unified spatial data format, high query and analytical efficiency and practicability.

Key words: roadway construction; mining production; 4D spatio-temporal; dynamic simulation

地下矿采矿活动涉及了地质、采掘、通风、运输等多个生产环节, 井巷施工及采矿生产产生的数据具有显著地多源、多量、多维、多尺度、多时态等特征, 在地下矿开采的生产实际中, 巷道的掘进和矿体的被开采情况等都具有时空动态变化特征。目前一些矿业发达国家已提出将地下矿采矿活动中涉及到的各类数据, 例如井巷施工过程中的相关数据、地质钻孔数据、三维块体模型数据、采矿生产过程数据等集成到同一个数据库中来进行管理, 如南非的 MineRP 公司设计开发的 SpatialDB、美国科罗拉多矿业学院的“Intelligent Underground”项目以及澳大利亚的“CSIRO Virtual Mine”项目^[1,2]。目前, 国内在地下矿静态空间数据模型构建方面的研究成果已颇为丰富, 提出了多种

模型系统, 如包含三维矢量数据和八叉树块段的混合数据模型^[3]、利用 AME 技术开发三维可视化井巷工程实体造型系统^[4]、基于 Arc-GIS 的矿井三维建模方法等。而对于三维数据模型如何与动态时间数据集成表示和分析尚不多见, 主要是郭达志等采用四维空间线性编码技术, 提出了一种用于矿业开发的空间和时间综合四维数据模型^[5]。近年来, 随着技术的进步, 在地下矿井巷施工及采矿生产过程时空动态变化的相关研究上, 研究方法也有了一些进展^[6-8], 有部分学者采用 Oracle Spatial 进行空间数据建模, 来处理多源数据, 降低了数据专业性, 同时提高空间数据的标准化共享能力。

纵观以上的国内外研究发现, 如何有效的利用当前的数据库技术来组织和管理地下矿时空数据,

以实现地下矿井巷施工及采矿生产过程的 4D 动态模拟, 并根据井巷开挖、矿体开采及进度模拟等不同需求来快速、高效的对地下矿生产活动进行 4D 动态表达和模拟具有重要意义.

1 Oracle Spatial 空间数据类型

井巷施工及采矿生产产生的数据具有多源、多量、多维、多尺度、多时态等特征, 而 Oracle 可提供业界领先数据库所具有的安全性、可伸缩性和高性能, 以便管理数 TB 字节的数据集, 这满足了地下矿井巷施工及采矿生产产生数据的多源异质性; Oracle Spatial 提供的空间信息模块包含 SQL 模式和便于存储、检索、更新、查询的函数集, 可用于空间数据的定义和存储, 这解决了地下矿时空数据的多源、多维和多尺度性; 但 Oracle Spatial 将空间数据和属性数据结合起来管理也带来了相应的问题, 最突出的就是空间数据的数据量往往是海量的, 因此它所提供的功能还包括空间索引以及高效的查询分析优化, 这满足了采矿生产过程数据的多时态性、多变性的需求, 使其能更加快速、准确地查询空间对象及其属性.

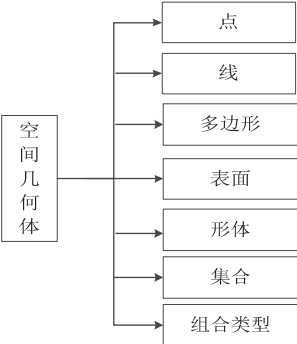


图 1 Oracle Spatial 的三维空间存储模型
Fig. 1 Oracle spatial 3-D storage model diagram

对象名	SDO_ELEM_INFO	SDO_ORDINATES	示意图
点	(1,1,1)	(Xa,Yb)	$A \bullet (Xa,Yb)$
线	(1,2,1)	(Xa,Ya,Xb,Yb,Xc,Yc)	$A(Xa,Ya) \rightarrow B(Xb,Yb) \rightarrow C(Xc,Yc)$
矩形	(1,1003,3)	(Xa,Ya,Xc,Yc)	$A(Xa,Ya) \rightarrow C(Xc,Yc)$
体	(1,1007,3)	(Xa,Ya,Za,Xc,Yc,Zc)	$A(Xa,Ya,Za) \rightarrow C(Xc,Yc,Zc)$

图 2 SDO_ELEM_INFO 和 ORDINATE 实例
Fig. 2 SDO_ELEM_INFO and ORDINATE instance

Oracle Spatial 11g 数据库提供了对空间数据的管理方法, Oracle Spatial 的数据模型是层次结构, 它由元素、几何体和空间图层组成. 元素是 Oracle Spatial 中的基本单元, 如图 1 所示, 几何体由一系列元素构成, 体现了空间实体的特征. 其中表面、

形体和组合类型是三维存储模型中所特有的. 组合类型包括表面和形体间的组合, 集合所有基本元素的集合.

2 地下矿动态变化的 4D 时空模型

2.1 地下矿时空对象

2.1.1 时空对象空间关系

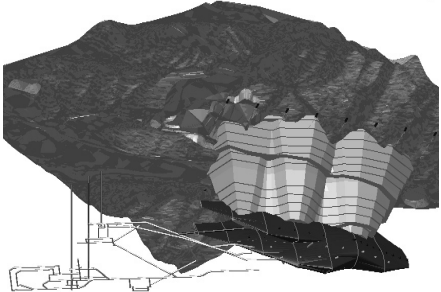


图 3 地下矿施工区实体图
Fig. 3 Underground mining simulation diagram

在地下矿采掘施工过程中, 矿区地理实体处在一个不断变化的空间中, 地下矿区有多种实体, 如下图 3 所示, 按照面向对象的观点, 将这些地理实体分别看作是对象, 而每个对象又由 3 部分构成: 空间信息、属性信息和时变信息. 这里把地下矿涉及的时空对象划分为四类, 分别是时空点对象、时空线对象、时空面对象、时空体对象. 而它们之间又有相对应的空间关系.

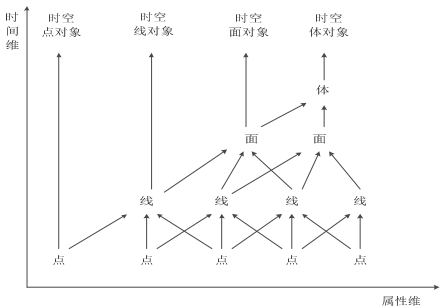


图 4 面向对象时空对象模型的基本框架
Fig. 4 Basic framework of object-oriented spatio-temporal data model

如图 4 所示, 空间的基本组成要素是点, 而点的空间位置附加上属性维和时间维就构成了时空点对象; 多个点对象依次连接而成的线段就组成了线对象 (包括直线、曲线), 同理加上属性维和时间维构成时空线对象; 将多条线序列有组织的排列起来就构成了面对象 (包括多边形、平面和复合面), 这里只考虑基本复合面, 同理构成时空面对象; 体对象不仅限于依次由多个面序列组成, 它还是一种空间分块结构, 包含了点对象、线对象和面对象的存储信息, 然后附加时间维构成时空体对象, 这里只考虑基本体, 对复杂凹凸不平面构成的

体可以进行划分的将划分为多个基本体构成。

2.1.2 时空对象分类

地下矿采矿活动涉及到多种对象，根据其时变信息的不同和空间属性的不同，可把这些对象抽象为四类：一是时空点对象，它包括施工人员、运输设备、钻孔点、井下环境监测点等。二是时空线对象，其不仅具有时间属性，而且是线性的三维空间对象，它包括井巷掘进工程中竖井、斜井、平巷等

中轴线以及勘探线、运输路线和人员的行走路线等。三是时空面对象，它是存在于空间的二维数据对象。包括矿区的环境如围岩、水域以及采矿的工作面，采场剖面 and 原始地表等。四是时空体对象，它包括井巷工程的分块模型、岩体、矿体模型等。针对上述四类对象的属性数据的特点及组织方式，其时空数据分别可以分为静态和动态两类。如下表 1 所示。

表 1 地下矿时空对象分类
Tab. 1 Underground ore space-time object classification

对象名称	分类	属性	举例	详细说明
时空点对象	静态点数据	数据固定不变	避难硐室	具有绝对坐标，且不随时间而变
	动态点数据	数据随着时间的变化而变化	人员	空间位置随时间变化
			运输设备	空间位置随时间变化
			钻孔点	属性随时间变化
时空线对象	静态线型数据	数据固定不变	设备监测站	属性随时间变化
	动态线型数据	由点对象序列构成的线型数据	竖井等中轴线	具有固定空间位置
			勘探线	由钻孔点序列构成
			运输路线	由设备移动点序列构成
时空面对象	基本面型数据	无内部特征	人员的行走轨迹	人员位移的点数据构成
	动态面型数据	由线数据构成	围岩、水域	属性和位置都都固定
			采场剖面	形状随时间而变化
			地质剖面	由地质数据构成
时空体对象	基本实体	无内部特征	原始地表	由地表线构成
	动态实体	属性、空间位置随时间而变化	岩体	空间位置固定
			块体	品位、被开采情况等随时间而变
			巷道分块	人员、运输设备、开采设备和设备检测站的属性信息随时间而变

2. 2 基于 SDO_GEOMETRY 的时空对象数据结构

根据上述时空对象的多样性、复杂性，可知地下矿 4D 时空数据的管理不仅要涉及属性数据，还需要考虑空间和时间信息，因此传统的数据库无法满足的时空数据存储的要求。而采用 Oracle Spatial 的对象关系模型能够将空间数据及其时间数据和相关属性数据存储在同一时空数据库中，实现数据的统一化管理，既解决了集中存储的问题，同时也

解决了过去使用 MapInfo 等 GIS 软件造成的空间、属性数据分离的问题，从而可更好的实现地下矿施工及采矿生产活动的动态模拟。而主要方法是通过 LOCATION 字段来存储每个时空对象的空间数据，Spatial 中提供了 MDSYS.SDO_GEOMETRY 这一抽象数据类型，可以用来描述任何的复杂实体对象。从图 5 可以看出，利用这样的表结构可以对地下矿的所有时空数据进行统一化的存储和模拟。



图 5 地下矿时空数据的统一化存储结构

Fig. 5 The unity of the underground mine data storage

根据井下施工及采矿生产涉及的实体特征，将地下矿所涉及的时空实体抽象为点、线、面、体四

类，根据不同类的实体在地下矿施工及开采过程中的特征和空间信息，提出了各自的时空数据结构。

(1) 地下矿点对象的时空数据结构

表 2 地下矿点对象存储表

Tab.2 Underground mines object storage table

列名	几何类型	X 坐标	Y 坐标	Z 坐标
数值	3 001 (定义点)	X 坐标值	Y 坐标值	Z 坐标值
数据类型	int	double	double	double
长度	4 字节	8 字节	8 字节	8 字节

(2) 地下矿线对象的时空数据结构

表 3 地下矿线对象存储表

Tab. 3 Underground ore line object storage table

列名	几何类型	子线段数目	坐标点数目	三元数组	点序列数组
数值	3 002 (定义线串)	构成当前线段的子线段数目	当前线段包含的坐标点数目	每个子线段在点序列数组中的开始位置	所有点坐标信息
数据类型	int	double	int	int	ponit
长度	4 字节	8 字节	4 字节	4 字节	根据点数目而定

(3) 地下矿面对象的时空数据结构

表 4 地下矿面对象存储表

Tab. 4 Underground ore surface object storage table

列名	几何类型	子环数目	坐标点数目	三元数组	点序列数组
数值	3 003 (定义面)	构成当前面的子环数目	当前面包含的坐标点数目	每个子环在点序列数组中的开始位置	所有点坐标信息
数据类型	int	double	int	int	ponit
长度	4 字节	8 字节	4 字节	4 字节	根据点数目而定

(4) 地下矿体对象的时空数据结构

表 5 地下矿体对象存储表

Tab. 5 Underground ore body object storage table

列名	几何类型	子面数目	坐标点数目	三元数组	点序列数组
数值	3 007、3 008 (定义体)	构成当前线段的子面数目	当前体包含的坐标点数目	每个子面在点序列数组中的开始位置	所有点坐标信息
数据类型	int	double	int	int	ponit
长度	4 字节	8 字节	4 字节	4 字节	根据点数目而定

表 6 地下矿时空数据对象数据获取方式

Tab. 6 Underground mining temporal-spatial data object access

分类	地下矿数据对象	获取方法
点对象	人员、车辆、设备	RFID、WIFI 定位
	钻孔点	地质资料
	避难硐室	直接数据
线对象	竖井、斜井、平巷、副井	地质资料
	勘探线	地质资料
	人员、设备轨迹线	矿井人员监测系统
面对象	围岩、水域	地质资料
	采场剖面、原始地表	地质数据
体对象	岩体	地质数据
	矿体、巷体	测量数据

3 4D 时空数据模拟应用

3.1 时空数据采集

从上述地下矿时空数据分析的结果可以看

出, 地下矿所涉及的数据对象类型复杂, 就目前采集数据的方法而言, 主要是利用现有地质资料、3D 地质模型数据和“六大系统”中的矿井人员定位系统、井下环境监测系统等来采集数据, 表 6 是对不

同地下矿数据对象获取方法的分类。

3.2 地下矿 4D 时空数据库构建

地下矿时空数据库的构建主要是面对两类时空目标,即井下施工巷道和开采矿体,其中巷道是采矿生产中将矿石从工作面运送到地面,以及通风、安全输送工人的通道,而矿体则是地下矿开采的直接实体。对整个矿井而言,巷道和矿体都是矿山生产活动中的重要实体。在以往的建模方案中都把巷道抽象为线条来处理,而本文采取把巷道这个三维柱形结构以分块形式来划分,并且把巷道内部的人员、设备等实体都包含在块体内。在对巷道体和矿体进行时空数据库的构建时遵循一定的地质规则,具体规则如下:

3.2.1 巷道和矿体划分准则

巷道分块的基础是确定划分精度和准则,根据巷道时空数据对象的构成,巷道内部包括了生产人员、设备等数据。巷道的精度必须要与人员定位的精度、设备监测的精度相匹配。巷道分块精度的确定可以根据最大误差原则,描述如下:

设 P_1 、 P_2 、 P_3 分别为巷道的测量、人员定位及设备定位的误差绝对值,那么巷道分块的最终精度可以表示为 $P=\max(P_1, P_2, P_3)$ 。

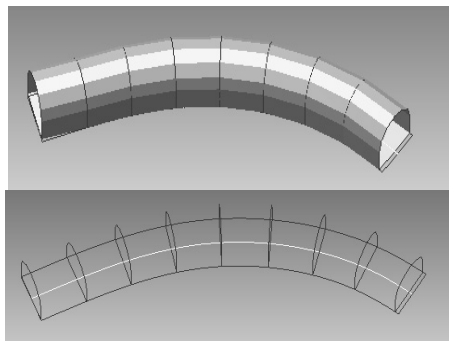


图6 巷道分块示意图

Fig. 6 The roadway block diagram

由于井下的环境限制,根据测量统计,巷道数据的水平误差和高程误差约 110 mm,误差为毫米级;人员定位数据主要来源于目前几种主流的定位技术,如 RFID、Zigbee、WIFI、UWB 等,由于定位精度与成本成正比,一般情况定位误差的量度为 m;设备监测系统包括瓦斯监测,一氧化碳、氧气、风量、粉尘等监测,一般情况下空间监测的量度也为 m。分析得出以下结论:误差的大小会影响度量值的选择,在三类系统中,测量系统的误差值相对较小,人员定位系统的误差较大,因此根据最大误差原则,巷道分块数据应以 m 为取值单位,又考虑到地下矿数据是以海量 TB 级数据来存储,故

最终确定巷道的划分精度为 10m 然后根据巷道中线以 10m 步距进行巷道块划分,巷道分块数据内部包含了在此范围的人员及设备监控检测数据,如图 6 所示。

矿体分块数据的来源主要是依据 Surpac、3Dmine 等三维矿业软件构建的块体模型数据,而时间属性则是根据矿体的采掘进度和计划时间来进行赋值,由这些共同组成时空矿体数据。

3.2.2 地下矿 4D 时空数据库构建

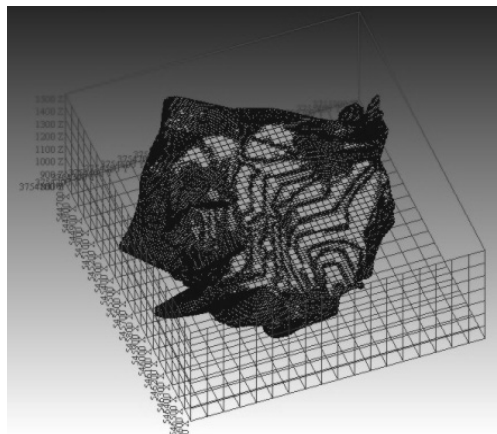


图7 矿体分块示意图

Fig. 7 The orebody block diagram

以某钼矿数据为例,结合所划分的巷道分块数据和矿体分块的部分字段为例,块体结构如图 7 所示,体对象有复杂对象和基本对象之分,这里只研究基本对象,复杂对象可以划分为基本对象的组合体。如果实体对象抽象为点、线、面或复杂多边形等只需依据 MDSYS.SDO_GEOMETRY 所制定的相应规则进行描述即可。巷道分块数据和矿体数据表如表 7 所示。其中 LOCATION 字段为 Oracle Spatial 中提供的抽象数据类型,在创建时空表后可通过插入语句来实现。

```
INSERT INTO ORE_BODY VALUES(1123,
0.065, 5.9, 230, true, '2013-6-3 10:07:28', '2013-6-3
11:07:28' SDO_GEOMETRY
```

```
(3008,NULL,NULL,SDO_ELEM_INFO_
ARRAY(1,1007,3,),SDO_ORDINATE_
ARRAY( 2243.943
,4773.237,233.482, 2253.943,4783.237,233.482,);
```

3.2.3 巷道施工及矿体开采时空数据动态模拟

地下矿井巷施工及采矿生产涉及的数据量巨大,主要包括点、线、面、体等四类,且都是以 TB 为单位存储,因此在这些海量数据中查询检索就尤为重要,根据地下矿生产进度计划的需要,要依据其结果制定巷道掘进、采矿作业计划的报告,这都可通过 Oracle Spatial 的查询语句来进行模拟实现。以井巷施工数据为例,如图 8 为巷道施工原始

一种4D时空数据动态模拟技术,但地下矿时空数据的研究较为复杂,仍有诸多需要解决的问题,本文尚未触及.本研究力求为地下矿时空数据管理、可视化及工程应用奠定一定的基础,并可在隧道、桥梁等工程施工领域进行推广应用.

参考文献 References

- [1] BUCKLEY J. Monitoring the vibration response of a tunnel boring machine: application to real time boulder detection[J]. Dissertations & Theses Gradworks, 2015, 34-37.
- [2] Han K K, Golparvar-Fard M. Appearance-based material classification for monitoring of operation-level construction progress using 4D BIM and site photologs[J]. Automation in Construction, 2015, 53:44-57..
- [3] 熊书敏,王李管,陈忠强等. 地下矿可视化管控系统空间数据模型[J]. 计算机应用. 2012,32(2):581-584
XIONG shummin, WANG liguan, CHEN zhongqiang et al, Patial data model for underground mine 3D visual reduction management and control system[J], Journal of Computer Applications, 2012,32(2):581-584
- [4] 侯运炳,魏书祥,胡乃联. 地下矿井巷工程 CAD 及造型系统 3DMS 的研究与开发[J]. 北京科技大学学报. 1998(3):205-210
HOU yunbing, WEI shuxiang, Hu nailian. Research and development of computer aided underground mining design and solid modeling system 3DMGS[J], Journal of University of Science and Technology Beijing, 1998(3):205-210
- [5] 郭达志,杨维平,韩国建. 矿山地理信息系统中的空间和时间四维数据模型[J]. 测绘学报. 1993,22(1):33-40
GUO dazhi, YANG weiping, HAN guojian. A spatial and temporal 4D data model for mine GIS[J], Acta Geodaetica Et Cartographica Sinica, 1993,22(1):33-40
- [6] 王云帆. Oracle Spatial 空间数据存储管理技术的应用研究[J]. 测绘通报, 2011(6): 76-79.
WANG yunfan. On the application of oracle spatial spatial data memory management technique[J], Bulletin of Surveying and Mapping, 2011(6): 76-79
- [7] 宋伟东,陈虎维,李兰勇. 露天矿采场时空数据模型的构建与应用[J]. 测绘工程. 2009,18(5):1-5
SONG weidong, CHEN huwei, LI lanyong. Establishment and application for spatio-temporal data models of an open-pit stope[J]. Engineering of Surveying and Mapping, 2009,18(5):1-5
- [8] 胡长明,熊焕军,龙辉元,等. 基于BIM的建筑施工进度-成本联合控制研究[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版), 2014, 46(4):474-478
HU Changming, XIONG Huanjun, LONG Huiyuan et al. Study on cost and schedule combined control of 4D model based on building information modeling(BIM)[J], Xi'an Univ. of Arch. &Tech: Natural Science Edition, 2014, 46(4):474-478

(编辑 沈波)

(上接第609页)

参考文献 References

- [1] 李健,王宗敏,马玉荣等. 多站激光点云数据全自动高精度拼接方法研究[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2014, 26(9):41-42.
- [2] 孙殿柱,崔传辉,康新才等. 基于散乱点云数据的五轴数控加工刀轨生成算法[J]. 农业机械学报, 2012, 43(5):226-229
- [3] 吴宾,余柏菴,岳文辉等. 一种基于车载激光扫描点云数据的单株行道树信息提取方法[J]. 华东师范大学学报(自然科学版), 2013, (2):38-49
- [4] 宫钰嵩,张岩,文艳,等. Kinect 扫描数据驱动的几何建模方法[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2014, (11):1957-1965.
- [5] 胡鑫,习俊通,金桦等. 反求工程中散乱点云数据的自动分割与曲面重构[J]. 上海交通大学学报, 2014, 38(1):62-65
- [6] 徐伟恒,冯仲科,苏志芳等. 一种基于三维激光点云数据的单木树冠投影面积和树冠体积自动提取算法[J]. 光谱学与光谱分析, 2014, 24(2):465-471
- [7] 张德强,牛兴林,程杰等. 汽车散热盖模具点云数据曲面逆向重构技术研究[J]. 机械设计与制造, 2014, (7):243-245
- [8] 邹万红,陈志杨,叶修梓,等. 一种新的点云数据特征骨架提取方法[J]. 浙江大学学报:工学版, 2008, 42(12):2103-2107.
- [9] 郝泳涛,肖文生,胡雅俊. 离散点云数据的小波变换处理算法[J]. 同济大学学报:自然科学版, 2009, 37(5):674-679.
- [10] 张量,姜晓峰. 基于线元几何的旋转面点云数据旋转轴提取算法[J]. 计算机研究与发展, 2009, 46(10):1737-1742.
- [11] 王茹,周明全,邢毓华等. 基于聚类平面特征的三维点云数据精简算法[J]. 计算机工程, 2011, 37(10):249-251.
- [12] 程效军,贾东峰,刘燕萍. 海量点云数据轮廓特征线的快速生成算法[J]. 同济大学学报:自然科学版, 2012, 40(10):1559-1563.
- [13] 王小超,刘秀平,李宝军,等. 基于局部重建的点云特征点提取[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2013, 25(5):659-665.
- [14] OOTIRELI A C, GUENNEBAUD G, Gross M. Feature preserving point set surfaces based on non-linear kernel regression[J]. Computer Graphics Forum, 2009, 28(2): 493-501.
- [15] ZHU A L, SHORTRIDGE A, LUSCH D, et al. Feature extraction from 3D LiDAR point clouds using image processing methods[J]. Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering, 2011, 8159(5):361-372.

(编辑 沈波)

