

BIM 语义丰富研究与应用综述

姜韶华 张 博

(大连理工大学 建设管理系,大连 116024)

【摘要】近年来,随着 BIM 在建设项目管理中的应用不断深入,BIM 在语义方面逐渐面临着更高的要求。BIM 语义丰富已经逐渐成为当前研究热点,但目前仍缺乏关于 BIM 语义丰富的全面综述。因此,本文在广泛文献调研的基础上从方法和应用两个方面对 BIM 语义丰富进行了全面的回顾,梳理了 BIM 语义丰富研究涉及的关键技术及其应用现状,并分析和总结了现有研究的不足,为进一步开展 BIM 语义丰富相关研究及应用提供了参考。

【关键词】 BIM; 语义丰富; 语义 Web; 基于规则的推理; 机器学习

【中图分类号】TU17 **【文献标识码】**A

【版权声明】文集数据被中国知网重要会议论文全文数据库(CPCD)收录,被本刊录用并在中国知网网络首发正式出版,严禁侵权转载。

1 概述

1.1 背景

随着建筑信息模型(Building Information Model, BIM)的不断发展,其应用范围已经扩展到建设项目的各个阶段,推动了土木建筑工程领域的发展和进步。BIM 模型中的构件是具有几何和语义特征的完整对象,而不仅仅是像 CAD 模型中由点和线所定义的几何图形^[1]。当 BIM 包含的语义信息匮乏时,其应用范围和价值将受到限制。因此,随着 BIM 的蓬勃发展及其应用的延伸,需要越来越多的语义信息以便充分表达建筑模型^[2]。

在上述背景下,BIM 语义丰富在业内引起了广泛关注,并逐渐成为研究热点。促使 BIM 语义丰富研究蓬勃发展的驱动力主要来自两方面:第一,丰富 BIM 模型的语义有助于缓解互操作性问题;第二,语义丰富是在 3D 重建过程中实现将 3D 几何模型转换为 BIM 的关键。Belsky 等人将建筑模型的语义丰富定义为:专家系统推理规则引擎应用特定领域的规则集来识别有关输入建筑模型中建筑对象和关系的新事实,并将其添加到模型中的过程^[3]。然而,随着 BIM 语义丰富研究的深入,其方

法不仅限于基于规则的推理,因此,本文将 BIM 语义丰富定义为通过半自动或自动方式向 BIM 中添加有意义的语义信息的过程。

1.2 文献数据分析

由于目前尚未看到国内在 BIM 语义丰富领域的相关文献,因此本文选择了在建筑领域覆盖范围广且在跨学科研究领域具有优势的 Scopus 数据库作为主要文献数据来源^[4]。BIM 语义丰富作为新兴研究领域,目前只有极少数侧重于 BIM 语义丰富方法的文献在标题、摘要及关键词中明确提及“BIM 语义丰富”,其他多数文献虽未明确提及,但其全文本质上仍与该主题相关,因此,截至 2020 年 7 月,本文在 Scopus 数据库中按照以下检索式进行文献检索:((TITLE - ABS - KEY(("semantic enrichment") OR ("semantically rich") OR ("semantically enriched") OR ("rich semantic")) OR TITLE - ABS - KEY(("three - dimensional reconstruction") OR ("three dimensional reconstruction") OR ("3 - d reconstruction") OR ("3d reconstruction")))) AND TITLE - ABS - KEY("BIM"))。在上述检索式中,“TITLE - ABS - KEY”是指“标题—摘要—关键词”。

【基金项目】 国家自然科学基金面上项目“数据与知识双驱动的建筑工程施工质量智能合规性检查与问题防治研究”(编号:52078101)

【作者简介】 姜韶华(1971 -),男,副教授,博士,主要研究方向:信息技术支持的工程管理。

针对按照以上检索式初步得到的 159 篇文献, 本文采用了以下筛选标准:

1) 将主题范围限制在: 计算机科学、工程;

2) 将文献类型限制在: 会议论文、期刊研究性论文、综述、书籍章节。

经过 1)、2) 两步后, 文献数量下降至 136 篇, 之后通过阅读标题、摘要及关键词进行人工筛选, 进一步剔除无关文献, 最终得到 89 篇与 BIM 语义丰富主题相关的文献。上述 89 篇文献中各类型占比如表 1 所示, 按照年份的分布如图 1 所示。图 1 中 2020 年文献数量为 8 篇, 这是截止 2020 年 7 月的检索结果, 并非 2020 年全年的相关文献数量, 因此, 总体而言, BIM 语义丰富相关研究在近年来呈现持续增长趋势, 尤其是在 2014 年以后呈现高速增长态势。表 2 列出了出版 3 篇及以上相关文献的主要来源。表 3 总结出了上述 89 篇文献中出现超过 10 次的高频关键词。

表 1 相关文献的各类型占比

文献类型	百分比 (%)
会议文章	52
期刊研究性文章	44
综述文章	4

表 2 所选文献的主要来源

文献来源	出版的相关文献数
Automation in Construction	14
International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences - ISPRS Archives	13
Journal of Computing in Civil Engineering	7
Advanced Engineering Informatics	5
Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)	4
Computing in Civil Engineering 2019: Visualization, Information Modeling, and Simulation - Selected Papers from the ASCE International Conference on Computing in Civil Engineering 2019	3

2 BIM 语义丰富方法

BIM 语义丰富具有较强的需求导向性, 对于重建 BIM 和既有 BIM 两种情况而言, BIM 语义丰富的范围及内容存在一定差异, 如图 2 所示, 因此目前尚无方法能够保障实现 BIM 模型的全面语义丰富^[5]。虽然目前多数 BIM 语义丰富过程仍是依赖专业人

表 3 所选文献中的高频关键词

关键词	出现次数
Architectural design(建筑设计)	75
BIM	65
Semantics(语义)	50
Information theory(信息理论)	32
3D computer graphics(3D 计算机图形学)	20
Point cloud(点云)	16
Semantic enrichment(语义丰富)	17
Information management(信息管理)	15
IFC	11
Data handling(数据处理)	11

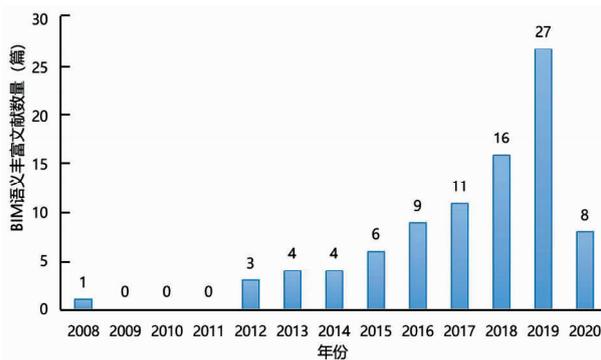


图 1 相关文献在 2008 ~ 2020 年的数量分布

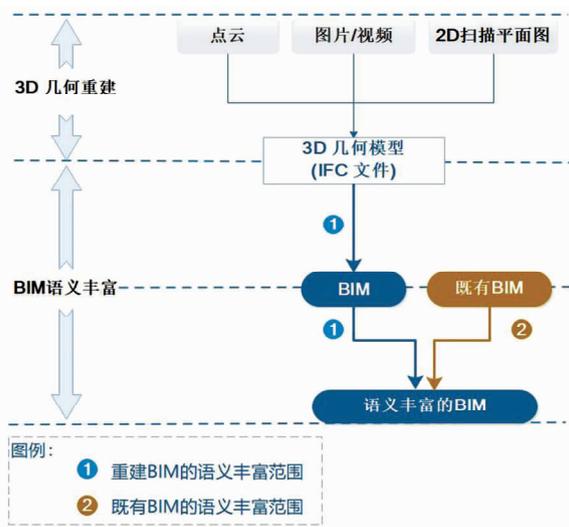


图 2 BIM 语义丰富的范围界定

员手动添加语义信息, 但已有一些研究提出了一些相对成体系且高效的 BIM 语义丰富方法。本节梳理了现有研究中的五种有代表性的 BIM 语义丰富方法及其涉及的关键技术, 并分析和总结了每种方法的适用范围和优缺点。

2.1 语义 Web

语义 Web 技术能够以结构化的图形表示信息,有效集成不同性质的建筑信息^[6],并能够通过推理工具从现有数据源中推断出新信息。BIM 在整合来自不同参与者的异构数据时面临挑战,因此,语义 Web 被用于 BIM 语义丰富以改善交互问题,例如工业基础类(Industry Foundation Classes, IFC)中语义连接的丢失,语义丢失和映射错误等。Farias 等人受 IFC 标准启发定义了本体来表示建筑信息,以便提高数据模型的表达能力^[7],该方法适用于解决 IFC 内部语义不足的问题,例如通过推理获得 IFC 的隐式语义后进行补充,但是它不能根据用户的需求添加或修改信息。Pauwels 等人将 IFC 与语义 Web 相结合用于丰富 BIM 语义并实现建筑性能检查^[8]。上述基于语义 Web 方法的局限性在于手工构建本体的过程相对耗时且低效。

2.2 基于规则的推理

基于规则的推理是一类广泛使用的 BIM 语义丰富方法,其中,BIM 语义丰富引擎(Semantic Enrichment Engine for BIM, SeeBIM)和桥梁语义丰富引擎(Semantic Enrichment Engine for Bridges, See-Bridge)具有较强的代表性。二者的共同点是基于专家系统进行 BIM 语义丰富,即使用规则集来推断和添加模型中未明确表示的信息^[9],但是二者所面向的对象不同,SeeBIM 主要面向建筑 BIM 模型,它利用前向链接来推断有关模型的新事实^[3],而 See-Bridge 则专注于桥梁 BIM 的构件分类问题,旨在快速、智能地测量和评估桥梁^[10]。

上述方法的局限性包括:1)多数规则集是基于专家经验编写的,推理结果的准确性和客观性依赖于规则集的准确性;2)复杂的结构(例如弯曲形状)无法用规则正确表示等。尽管 Wu 等人提出的用于 IFC 对象分类的基于规则的算法可以尽量避免专家知识中嵌入的主观性错误^[11],但是上述 2)局限性仍然未得到合理的解决。因此,此类方法仅适合处理具有简化的对象几何形状的模式。

2.3 机器学习

机器学习在 BIM 语义丰富中主要用来解决的是对象分类问题和语义完整性问题,其中对象分类问题包括构件分类和房间分类等。目前已有一些研究探索了基于机器学习解决对象分类问题的可能性。例如,Bloch 等人测试了使用机器学习算法

进行语义丰富的可能性,用于解决房间分类问题^[9]。Song 等人利用机器学习算法对 BIM 模型中的空间实例进行了自动空间类别分类^[12]。使用机器学习进行对象分类包括两个主要步骤:训练和预测。在语义完整性方面,Koo 等人应用支持向量机检查 BIM 元素和 IFC 类之间的映射的语义完整性^[13],从而有效地添加特定领域所需的语义。Ferguson 等人提出的扩展对象 R-CNN 也可用于丰富 BIM 模型的语义^[14]。

机器学习方法克服了基于规则的推理的一些局限性,如编译规则的复杂性和主观性,但在对象分类时仍然面临着获取适当的且足够大的数据集以及提取最相关和最有意义的特征的挑战^[9]。

2.4 基于云的 BIM 平台

基于云的 BIM 平台采用 NoSQL 的云数据库从而以协作的方式丰富和共享 BIM 模型,这种基于云的工作模式使得用户可以自由查询和丰富模型对象^[15],该方法可以与其他 BIM 语义丰富方法结合使用,例如将云平台用作 SeeBIM 的存储库。

虽然该方法表现出了较高的可协作性,但其自动化程度相对一般,因此,必要时可以将其与其他 BIM 语义丰富方法结合使用,从而实现多种 BIM 语义丰富方法的优势互补,提高语义丰富效率。

2.5 BIM - Annotator

BIM - Annotator 是一种基于 Web 的注释工具,可用于改进 BIM 模型的语义质量并链接来自各个域的特定域信息^[16],它为任何 3D 几何模型(例如从 CAD 模型转换或通过激光扫描技术生成的 3D 几何模型)的语义丰富提供了可能性,而不仅限于 IFC 模型。该方法的优点是可以链接不同域之间的数据进行交换,以用户友好的标准方式分析信息并实现在线协作,但缺点是尚不允许用户将非 BIM 数据(如文档和照片)链接到模型元素。

3 典型应用

BIM 语义丰富作为研究热点,已经在建设项目的全生命期中有了初步的应用,包括设计、施工和运维阶段^[17],如表 4 所示。

3.1 设计阶段

BIM 语义丰富在设计阶段主要应用于自动化设计审查、消防安全设计等方面。设计审查通常要求用户在使用一些商业模型检查系统前对模型数据

表 4 BIM 语义丰富在不同阶段的应用点

阶段	典型应用
设计阶段	自动化设计审查、消防安全设计等
施工阶段	质量、进度和安全等方面的监控和管理
运维阶段	建筑能耗性能评估、历史建筑维护、缺陷检测等

进行规范化,并且检查范围仅限于可以用 IF - THEN 规则集表示的条款^[18]。BIM 语义丰富在上述过程中被应用于提高对模型数据进行规范化过程的自动化程度,便于满足特定检查工具的信息需求。Santos 等人开发的基于 BIM 的环境和经济生命周期评估 (BIM - based Environmental and Economic Life Cycle Assessment, BIMEELCA) 工具实现了对 BIM 进行可持续发展相关的语义信息丰富^[19]。在消防安全设计方面,Atyabi 等人通过语义丰富向 BIM 模型中添加了有关应急设施的信息和语义信息^[20],提高了仿真用的模型质量,实现了建筑火灾紧急疏散仿真效果的优化。

3.2 施工阶段

BIM 语义丰富在施工阶段主要应用于质量、进度和安全等方面的监控和管理。BIM 被用于共享和更新在施工过程中生成的信息^[21],虽然基于 IFC 的数据交换已经取得了一定的进展,但尚未实现完全有效的互操作性^[22]。目前已有研究在建筑模型的预制混凝土构件中用语义上有用的概念补充 IFC 交换文件^[3],该研究利用 SeeBIM 从包含在建筑模型中的显式和隐式信息中推断出有用的语义概念。此外,Hamledari 等人基于对已检查的建筑元素的现场观察,丰富 IFC 数据模型的语义从而自动更新 BIM 模型^[23]。在进度监控方面,BIM 语义丰富被用于自动更新在建建筑的 BIM 模型,便于准确有效地跟踪、分析和可视化在建建筑物的实际施工状态^[24]。例如,Hamledari 等人将进度计划和实际施工进度合并到设计 BIM 模型中,更新已完成进度的百分比,并根据其实际和预期进度对 3D 对象进行颜色编码^[25]。此外,BIM 语义丰富也被应用于基于 3D 重建的施工进度监控中,因为通过 3D 重建获得的初始模型没有语义信息,这阻碍了进度监控的实施。在安全监控方面,BIM 数据需要根据建筑环境的当前状态不断更新,尤其是施工现场工人的时空轨迹信息,这对现场的安全决策具有重要意义^[26]。例如,Arslan 等人将时空轨迹整合到 BIM 模型

中^[27],丰富了 BIM 模型的语义信息后从建筑环境的角度可视化入侵,使得安全管理人员可以主动执行必要的操作从而避免建筑物中的不安全情况^[28]。

3.3 运维阶段

BIM 语义丰富在运维阶段主要应用于建筑能耗性能评估、历史建筑维护、缺陷检测等方面。对于能耗性能评估而言,BIM 语义丰富是在能耗仿真前进行的,主要体现在建筑对象识别和语义信息添加以满足特定能耗仿真平台的语义需求,提高互操作性。此外,由于既有建筑物中多数没有可用的 BIM 模型,因此在进行能耗仿真前需要先进行三维重建来获得 BIM 模型。Bortoluzzi 等人提出了使用 2D 平面图和立面图来自动生成满足能耗仿真所需的语义需求的 BIM 的方法^[29]。O'Donnell 等人提出了一个半自动化的过程,将 TLS 捕获的点云数据自动转换为 EnergyPlus 可用的几何格式^[30],并进行了手动的 BIM 语义丰富,即添加了给定建筑物的基本语义信息。在历史建筑维护方面,历史建筑信息模型 (Historic Building Information Modelling, HBIM) 被用于支持文化遗产建筑、建筑群及其相关信息的语义知识存储^[31]。应用 BIM 语义丰富是为了将获取到的多源语义信息(例如建筑材料的颜色和纹理,当地气候条件等)整合到 HBIM 中,并不断进行更新和改进^[32],使其满足历史建筑语义表示的要求^[33],并促进历史建筑生命期中的信息和知识管理^[34]。在缺陷检测方面,BIM 语义丰富已经被应用于非接触式缺陷检测所涉及的对象识别中^[10,35]。

4 结论

近十年来,BIM 语义丰富逐渐成为研究热点,相关文献数量持续增长。本文在广泛的文献调研的基础上对有关 BIM 语义丰富的研究进行了深入的综述,阐明了最新的研究进展,并从方法和应用两个方面对相关文献进行了分析和总结,梳理出了 BIM 语义丰富涉及的关键技术及其在建设项目生命期各个阶段中的应用状况。

目前,BIM 语义丰富是国际上土木建筑工程领域的新兴研究热点,国内目前在该领域的相关研究较少,整体来看,BIM 语义丰富的研究和应用尚处于初级阶段,多数 BIM 语义丰富方法的自动化水平不高且应用场景有限,仍然存在一些技术瓶颈及挑战。尽管如此,未来 BIM 语义丰富具有巨大的发展

潛力且有大量潛在應用場景亟待探索,在提高 BIM 語義豐富方法的自動化水平和效率後將進一步推動建設項目管理向智能化、高效化發展。此外,BIM 語義豐富既可以與其他新興技術結合以拓展應用範圍,也可以進一步擴展到城市信息模型(City Information Modeling, CIM)級別的語義豐富以促進智慧城市的发展和升級。

參考文獻

- [1] Obrock L S, Gülch E. First steps to automated interior reconstruction from semantically enriched point clouds and imagery[C]//International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 2018,781-787.
- [2] Babacan K, Chen L, Sohn G, Semantic segmentation of indoor point clouds using convolutional neural network [C]//ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 2017,101-108.
- [3] Belsky M, Sacks R, Brilakis I. Semantic Enrichment for Building Information Modeling[J]. Computer - Aided Civil and Infrastructure Engineering, 2016, 31 (4) : 261-274.
- [4] Yin X, Liu H, Chen Y, et al. Building information modelling for off-site construction; Review and future directions[J]. Automation in Construction, 2019, 101 : 72-91.
- [5] Czerniawski T, Leite F. Automated digital modeling of existing buildings: A review of visual object recognition methods [J]. Automation in Construction, 2020, 113 : 1-19.
- [6] Pauwels P, Zhang S, Lee Y. Semantic web technologies in AEC industry: A literature overview[J]. Automation in Construction, 2017, 73 : 145-165.
- [7] Farias T, Roxin A, Nicolle C, et al. A Rule Based System for Semantical Enrichment of Building Information Exchange[C]//Proceedings of the RuleML 2014 Challenge and the RuleML 2014 Doctoral Consortium, 2014, 2-9.
- [8] Pauwels P, Terkaj W. EXPRESS to OWL for construction industry: Towards a recommendable and usable ifcOWL ontology [J]. Automation in Construction, 2016, 63 : 100-133.
- [9] Bloch T, Sacks R. Comparing machine learning and rule-based inferencing for semantic enrichment of BIM models [J]. Automation in Construction, 2018, 91 : 256-272.
- [10] Sacks R, Kedar A, Borrmann A, et al. SeeBridge as next generation bridge inspection: Overview, Information Delivery Manual and Model View Definition[J]. Automation in Construction, 2018, 90 : 134-145.
- [11] Wu J, Zhang J. Automated BIM Object Classification to Support BIM Interoperability[C]//Construction Research Congress 2018: Sustainable Design and Construction and Education, 2018, 706-715.
- [12] Song J, Kim J, Lee J, Spatial information enrichment using NLP-based classification of space objects for school bldgs. in Korea[C]//Proceedings of the 36th International Symposium on Automation and Robotics in Construction, 2019, 415-420.
- [13] Koo B, La S, Cho N, et al. Using support vector machines to classify building elements for checking the semantic integrity of building information models[J]. Automation in Construction, 2019, 98 : 183-194.
- [14] Ferguson M, Jeong S, Law K H, Worksite Object Characterization for Automatically Updating Building Information Models[C]//Computing in Civil Engineering 2019: Visualization, Information Modeling, and Simulation, 2019, 303-311.
- [15] Ma L, Sacks R, A cloud-based BIM platform for information collaboration[C]//ISARC 2016 - 33rd International Symposium on Automation and Robotics in Construction, 2016, 581-589.
- [16] Ismail A, Srewil Y, Scherer R, et al. Semantic enrichment and multimodel data exchange approach for CFD analysis of bridges [C]//23rd International Workshop of the European Group for Intelligent Computing in Engineering, 2016, 1-9.
- [17] Xiong X, Adan A, Akinci B, et al. Automatic creation of semantically rich 3D building models from laser scanner data[J]. Automation in Construction, 2013, 31 : 325-337.
- [18] Sacks R, Bloch R, Katz M, et al. Automating Design Review with Artificial Intelligence and BIM: State of the Art and Research Framework[C]//Computing in Civil Engineering 2019: Visualization, Information Modeling, and Simulation, 2019, 353-360.
- [19] Santos R, Costa A A, Silvestre J D, et al. Development of a BIM-based Environmental and Economic Life Cycle Assessment tool [J]. Journal of Cleaner Production, 2020, 265 : 1-17.
- [20] Atyabi S, Kiavarz Moghaddam M, Rajabifard A, Optimization of emergency evacuation in fire building by integrated BIM and GIS[C]//International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences- ISPRS Archives, 2019, 131-139.
- [21] Kim M, Wang Q, Park J, et al. Automated dimensional quality assurance of full-scale precast concrete elements using laser scanning and BIM[J]. Automation in Construc-

- tion,2016,72;102-114.
- [22] Jeong Y S, Eastman C M, Sacks R, et al. Benchmark tests for BIM data exchanges of precast concrete[J]. *Automation in Construction*,2008,18(4) : 469-484.
- [23] Hamledari H, Azar E R, McCabe B. IFC-Based Development of As – Built and As – Is BIMs Using Construction and Facility Inspection Data; Site – to – BIM Data Transfer Automation[J]. *Journal of Computing in Civil Engineering*,2017,32(2) : 1-15.
- [24] Golparvar-Fard M, Peña – Mora F, Savarese S. Automated Progress Monitoring Using Unordered Daily Construction Photographs and IFC-Based Building Information Models[J]. *Journal of Computing in Civil Engineering*, 2015,29.
- [25] Hamledari H, McCabe B, Davari S, et al. Automated Schedule and Progress Updating of IFC-Based 4D BIMs [J]. *Journal of Computing in Civil Engineering*,2017,31 : 1-16.
- [26] Arslan M, Cruz C, Ginhac D. Semantic Enrichment of Spatio-temporal Trajectories for Worker Safety on Construction Sites[C]//The 9th International Conference on Ambient Systems, Networks and Technologies, 2018,271-278.
- [27] Arslan M, Cruz C, Ginhac D. Semantic enrichment of spatio-temporal trajectories for worker safety on construction sites[J]. *Personal and Ubiquitous Computing*,2019, 23:749-764.
- [28] Arslan M, Cruz C, Ginhac D. Identifying Intrusions in Dynamic Environments Using Semantic Trajectories and BIM for Worker Safety [C]//Fourth International Con-
gress on Information and Communication Technology. *Advances in Intelligent Systems and Computing*, vol 1027. Springer, Singapore,2020,59-67.
- [29] Bortoluzzi B, Efremov I, Medina C, et al. Automating the creation of building information models for existing buildings[J]. *Automation in Construction*,2019,105:1-13.
- [30] O'Donnell J, Truong-Hong L, Boyle N, et al. LiDAR point-cloud mapping of building facades for building energy performance simulation[J]. *Automation in Construction*,2019,107:1-16.
- [31] Maietti F, Di Giulio R, Piaia E, et al. Enhancing Heritage fruition through 3D semantic modelling and digital tools; The INCEPTION project [C]//IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2018,1-8.
- [32] Themistocleous K, Ioannides M, Georgiou S, et al. The innovative documentation of cultural heritage using H – BIM; Case study of Asinou church [C]//Proceedings of SPIE-The International Society for Optical Engineering, 2018.
- [33] Simeone D, Cursi S, Acierno M. BIM semantic-enrichment for built heritage representation[J]. *Automation in Construction*,2018,122-137.
- [34] Han R, Mo W, Shao D. Research on the Construction Strategy of Information Model for Manchuria Style Architecture and Its Application [J]. *International Journal of Smart Home*, 2016,10(7) : 175-184.
- [35] Kim M, Wang Q, Park J, et al. Automated dimensional quality assurance of full-scale precast concrete elements using laser scanning and BIM[J]. *Automation in Construction*,2016,72;102-114.

A Review for Research and Application of Semantic Enrichment for BIM

Jiang Shaohua, Zhang Bo

(*Dalian University of Technology, Department of Construction Management, Dalian 116024, China*)

Abstract: In recent years, as the application of BIM in construction project management continues to deepen, BIM is gradually facing higher requirements in terms of semantics. Semantic enrichment for BIM has gradually become a current research hotspot, but there is still a lack of comprehensive reviews on semantic enrichment for BIM. Therefore, based on extensive literature research, this paper reviews semantic enrichment for BIM from both methods and applications, sorts out the key technologies involved and application status, and analyzes and summarizes the deficiencies of existing research to provide a reference for further research and application.

Key Words: BIM; Semantic Enrichment; Semantic Web; Rule-Based Reasoning; Machine Learning