

基于 BIM 的合规性自动审查

林佳瑞¹, 郭建锋²

(1. 清华大学 土木工程系, 北京 100084; 2. 广联达科技股份有限公司, 北京 100193)

摘要: 建筑工程合规性审查是确保设计或施工方案满足规范, 建设绿色、安全、舒适的工程的关键环节。传统人工核对方式对人员经验、水平要求高, 存在尺度不一、低效漏项、人为操控等弊端。该文对近年来合规性自动审查的有关研究应用做了全面调研和综述, 建立了基于建筑信息模型的合规性自动审查研究框架, 并从审查规则解译表达、信息建模扩展、规则推理执行及结果输出表现等方面综述了研究现状和不足之处。最后, 指出合规性自动审查的研究方兴未艾, 尽管已取得了丰硕的成果, 但在仍面临信息模型异构和语义鸿沟, 规则自动解译和开放、灵活共享, 复杂空间关系分析和大规模推理等巨大挑战。

关键词: 建设工程; 合规性审查; 自动规则检查; 规则推理; 建筑信息模型

中图分类号: TU17

文献标志码: A

文章编号:

DOI:

Automatic compliance checking in building and construction area

LIN Jiarui¹, GUO Jianfeng²

(1. Department of Civil Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

(2. Glodon Software Technology Limited Company, Beijing 100193, China)

Abstract: Compliance checking of building design is essential to provide a correct design for the construction of a green, safe, and comfort building. However, traditional approach to compliance checking is highly dependent on experienced experts. It is tedious and time-consuming for the engineers, and is hard to

收稿日期: 2019-08-29

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51908323);
国家重点研发计划项目(2018YFD1100905);
北京市自然科学基金资助项目(8194067)

作者简介: 林佳瑞 (1987—), 男, 助理研究员。
E-mail: jiarui_lin@foxmail.com

avoid mistakes and inconsistency made during the checking process. Therefore, this paper conducted a systematic review of recent research on automatic compliance checking to reflect the state-of-the-art in this area. A framework for automatic compliance checking is proposed, under which relevant researches were divided into four aspects: rule extraction and representation, information modeling and extension, rule reasoning and execution, result reporting and visualization. With the current status and limitation summarized in these four aspects, three challenges are concluded: 1) heterogeneous information model and huge semantic gaps call for a flexible and unified model, 2) automatic rule extraction and open environment for rule sharing need to be further investigated, 3) complex spatial relationship and large scale reason capacity are required for practice.

Key words: Building and Construction; Compliance Checking; Automatic Code Checking; Rule Reasoning; Building Information Model

改革开放以来, 我国经历了人类历史上最大规模、最快速度的城市化过程, 城市规模、人口爆炸式增长。大量的高层及超高层建筑、医疗及商业综合体既是城市功能的核心载体, 也是城市耗能^[1-2]与安全事故的主要场所^[3-4]。人们日益增长的舒适、节能与安全需求对建筑工程的设计、建造过程提出了更高的要求。

然而, 作为确保设计质量、保障工程建造的关键环节, 设计审查仍然高度依赖人工核对方式, 对相关审查人员经验、水平要求高, 且往往存在着审查尺度不一、低效漏项、人为操控等问题^[5-6]。2017年伦敦“格兰菲尔塔”火灾导致 81 人死亡就暴露出传统建筑防火设计审查所存在的低效漏项等一系列弊端^[3]。因此, 作为确保建筑满足规范要求、保障消防安全、实现舒适节能的关键环节, 设计审查的重要性日益凸显^[6], 直接关系到人民的生命财产安全。

当前, 建筑业正处在提质增效、转型升级的关键节点, 传统设计审查手段已难以应对劳动力成本、工程规模与复杂度不断增长的现状。因此, 亟需研

究设计审查的自动化方法与技术，实现设计审查标准的规范化表达与设计方案自动检查，使专业人员专注方案设计、优化，提升建筑设计水平，保障人民生命财产安全，服务城市生活品质提升。

针对上述问题及需求，本文选取“BIM”“Code checking”“Rule checking”“Compliance checking”及“建筑信息模型”“设计审查”“自动审查”等关键词，在中国知网及 Web of Science 核心数据库对 1994 年 1 月至 2019 年 7 月期间合规性自动审查相关的研究论文进行了全面检索与梳理，共检索到中英文文献 183 篇。通过逐一分析各有关文献摘要及关键词信息，并归并同一作者类似文献后，共计选取了 59 篇主要文献进行精读与总结（图 1）。基于文献调研，研究总结建立了合规性自动审查的基本研究框架，并分析了设计审查规则表达、信息建模、规则推理与结果表现等各研究方向的现状和不足，提出未来自动设计审查的需求和发展方向。

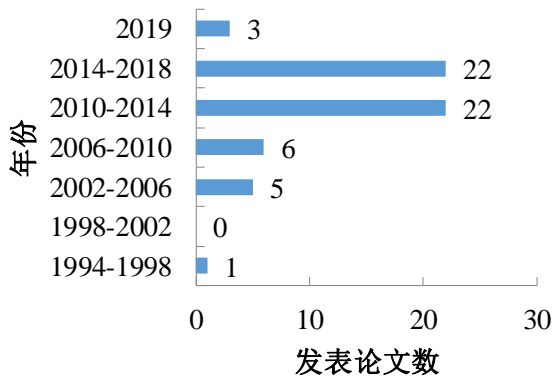


图 1 1994-2019 年自动设计审查主要论文统计

1 合规性自动审查的历史

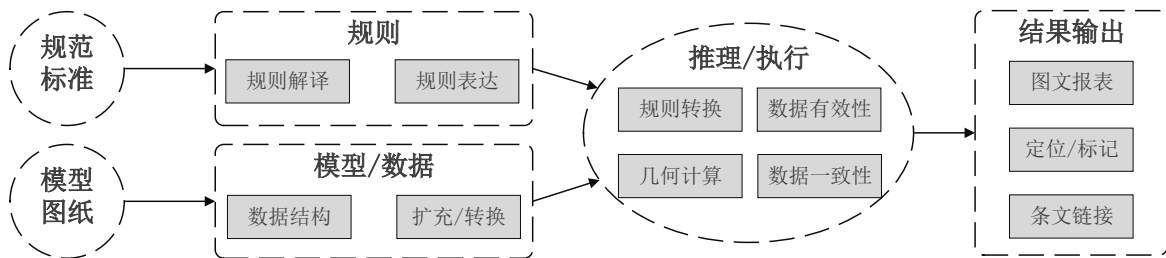


图 2 合规性自动审查的研究框架

2.2 规则解译

通常情况下，规范条文以便于人们阅读的方式表达，如文本、表格或公式。规则解译是将有关设计规范条文转换为为特定表达方式的规则的过程，以便于计算机处理^[9]。长期以来，规则的解译与更新

合规性自动审查又叫自动设计审查或自动规则检查（automatic rule checking），国际上相关研究最早可追溯到 20 世纪 80 年代^[7]。相关研究以 2000 年为分界点，可大致分为 2 个阶段。2000 年以前，设计信息的表达以计算机辅助绘图（Computer Aided Drawing, CAD）为核心，而规范要求的表达则通过决策表、计算机代码等形式内嵌在专家系统中。有关学者探索了相应规则检查方法在节能、成本、日照、火灾等方面的应用^[7-8]。2000 年以后，随着建筑信息模型技术（building information modeling, BIM）及相应数据标准——工业基础类（industry foundation classes, IFC）——的提出，可以利用 BIM 表达更加丰富的设计信息，基于 BIM 的自动设计审查技术和软件开始出现。

2 合规性自动审查研究现状

2.1 合规性自动审查的基本研究框架

佐治亚理工大学 Eastman 教授及其团队^[9]是该领域的先驱之一，他们于 2009 年对自动规则检查在建设工程领域的应用做了系统调研，并将相应过程总结为 4 个阶段：规范解读、模型准备、模型审查、审查报告。本文在其基础上，结合相关领域知名学者 Nawari^[10]、El-Gohary 与 Zhang^[11-12]、Amor 与 Dimyadi^[7, 13]、Solihin^[14-15]、Lee^[15]、Cai^[16-17]等的研究成果，建立出如图 2 所示合规性自动审查的研究框架。框架包括 4 大部分：规则、模型/数据、推理/执行、结果输出。下面依次对各部分相关成果进行分析综述。

均依赖领域专家人工实现^[18-19]。近年来，有关学者开始探索利用自然语言处理、本体论进行规则的自动或半自动提取^[16, 20-23]。但由于规范条文结构复杂^[24]、隐含领域知识等问题，自动化规则的提取仍然任重而道远，目前仅能在有限的领域实现规则自动或半自动提取^[2]（见图 3 统计结果）。

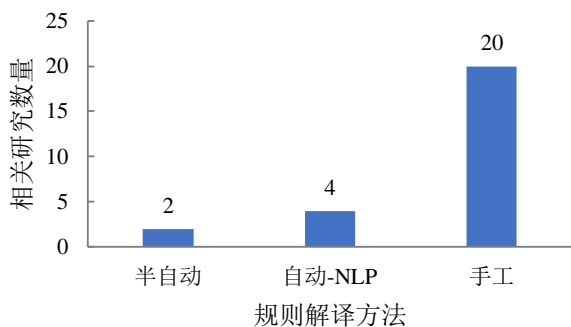


图 3 本文参考文献采用的主要规则解译方法

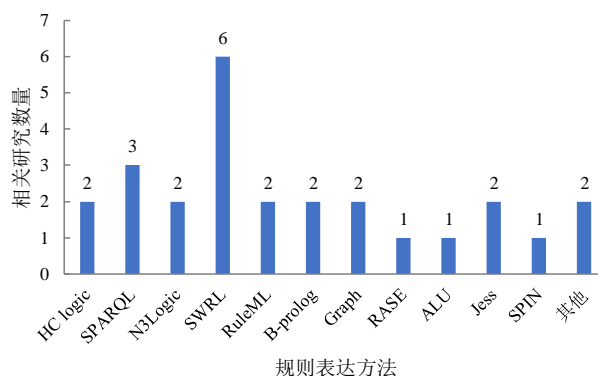


图 4 本文参考文献采用的主要规则表达方法

2.3 规则表达

规则表达则是采用某种标准形式表达提取或解译的规则的方法^[25]。规则表达最初直接采用计算机编程语言实现，但存在编辑修改要求高、不透明、难重用等问题，逐步发展出决策表/参数表、一阶谓词逻辑、本体等方式^[7, 9, 11, 26]。由于规则解译过程往往涉及两方面问题：一是规则应用的上下文语境或对象（如规则应用于梁还是门），二是规则应用的具体属性（如是门的尺寸还是材料）^[9]，因此往往需要引入以本体为代表的语义信息建模方法表达相应信息^[12, 25, 27-30]。尽管相关研究先后提出规范标记语言^[10, 21]、N3Logic、SWRL^[25]、LegalRuleML^[13]、Graph^[14, 31]、RASE^[32]等用以表达规范蕴含的知识和规则，但目前仍未形成开放、灵活的规范表达框架^[7]（图 4）。

2.4 模型数据结构

如图 5 所示，最初设计信息的表达以二维 CAD 的形式表达，只能通过给几何形体及其所属图层附加简单文本的形式来表达有关信息^[7]。该方式表达的信息非常有限，且需提前约定相应的信息表达方式。BIM 技术的提出，引入了基于面向对象的数据建模方法^[33-34]，可以表达构件类型、名称以及诸多几何属性信息（如图 5 中 IfcSpace 的名称、分区、楼层、面积等属性）^[35]。因此，BIM 模型相较 CAD 图纸蕴含了更加丰富的信息，可以更好的支持设计方案检查（如可直接进行空间大小、高度及功能的检查）^[9]。在 BIM 模型基础上，也有研究进一步针对自动设计审查提出并建立了其他的面向对象模型^[36]。

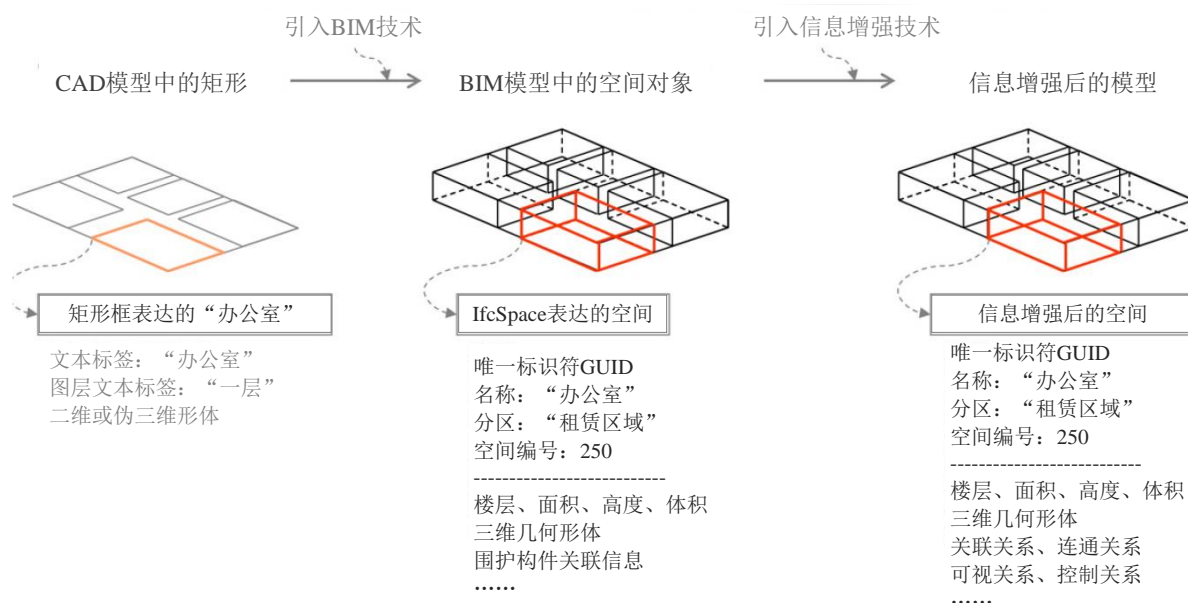


图 5 设计信息数据结构的演进

2.5 模型信息扩充与转换

然而，当前的 BIM 模型尚不支持对可视关系、连通关系等信息的表达与分析，因此需要引入空间

数据分析等信息增强或扩充方法，对相应信息进行计算和提取，并完善和扩充既有模型结构以容纳更多信息^[16, 37]。同时，考虑消防设计需要对逃生路径、

空间封闭性等进行检查，因此可能需要采用实体模型、表面模型等不同的三维形体表达方式和图结构^[19]、八叉树等提升特定规则检查效率的数据表达方式，以支持相应规则检查需求^[38]。最后，随着各国逐渐转向性能化设计模式，扩充设计 BIM 模型结构以容纳性能仿真信息，从而支持面向性能化设计的规则检查将是未来的发展趋势^[7, 9]。

2.6 规则推理执行

规则推理和执行主要涉及四方面内容：规则转换、几何计算、数据有效性和数据一致性。其中规则转换是将基于特定表达形式的规则转换为推理引擎的内部形式，如将规则转换为 Prolog 编程语言的形式^[39]。如推理引擎可直接支持采用的规则表达形式，则该步骤可以略过。例如，当前大多数语义推理引擎均可直接利用本体和 SWRL 语言进行推理^[40]。同时，也有研究利用可视化编程语言直观、易懂的特点，研究提出基于可视化编程语言的规则推理与检查方法^[41]。数据有效性则是在进行有关规则的检查 and 推理之前，对设计模型所包含的信息进行检查，以确保满足规则检查的需要（如在检查防火分区的要求之前应确定设计模型中已创建了分区信息）。因此，有学者提出模型视图技术来实现特定领域业务（如防火规则检查）数据需求的描述^[42]。几何计算则是指在当前 BIM 模型基本几何信息的基

础上，进一步分析各构件三维表达的空间关系（如包含、相交、上下等关系），从而为涉及各构件相对空间关系的规范条文检查提供支持^[43]。最后，数据一致性是指用以进行规则检查的不同模型视图之间应该相互一致，不存在冲突^[9]。

2.7 检查结果输出

最后是对规则检查结果的输出，输出形式包括表格、图片和模型标记等 3 种主要形式。图片输出和模型标记过程涉及的一个关键问题就是为特定规则检查问题选择合适的观察视角，也就是计算虚拟视点位置。为避免视线被构件遮挡，往往需要碰撞检测和相交检测算法确定视点位置^[44]。另一个问题则是在规范条文解译过程中建立规则与条文的对应关系，并在规则表达中记录相应信息。从而可在检查结果中直接输出未通过的规范条文，给工程人员提供更加直观易懂的结果^[45]。

2.8 主要研究应用领域

在以上大的框架下，近年来，有关学者先后探索了基于 BIM 的规则检查在建筑节能^[1, 2]、结构设计^[10]、施工安全防护^[46]、消防逃生^[6, 35, 47-49]、施工工艺^[12]、平面设计检查^[50]、管线系统检查^[33]、工程算量^[20]等多个方面的应用，详见表 1。

表 1 代表性研究及应用领域

应用领域	代表文献数	主要内容及应用领域
消防设计	6	消防规范分析 ^[48] ，逃生路径提取 ^[19] 、火灾逃生规则检查 ^[47] ，局部自动化审查 ^[6] ，规则硬编码 ^[3] 、基于既有软件 ^[45] 的审查方法
规则提取	4	施工工艺规则提取 ^[12] ，算量规范规则提取 ^[20, 51] ，节能规范规则提取 ^[2] （均仅仅选取规范某章节）
模型扩展	2	三维空间关系定义 ^[43] 、八叉树加速空间规则检查 ^[38]
施工应用	6	施工安全检查 ^[46, 52, 53] ，可施工性检查 ^[54] ，施工质量、规范检查 ^[29, 55]
其他应用	8	管线系统检查 ^[16, 33] ，建筑节能 ^[1, 40, 56] ，结构分析 ^[10, 57] ，规则推理效率 ^[58]

3 讨论与展望

综上所述可知，当前合规性自动审查已成为国际研究的热点，有关研究成果涉及规则解译表达、信息扩展建模、规则推理执行、结果输出展示各个方面。其中，规则表达方面已形成了决策表、一阶谓词逻辑等一系列方法，可较好表达基本设计审

查规则。同时，因 BIM 模型蕴含丰富的语义信息，已成为替代二维 CAD 的绝佳选择，广泛用于自动审查的研究与应用过程。推理引擎、空间分析加速等手段也已在设计审查中得以应用，显著提升了自动化水平。同时，模型信息的完整性以及有效性是支持自动设计审查的基础，只有模型完整包含特定领域的信息才能支持相应领域的自动设计审查^[15]。

然而,目前国内外尚未形成统一、标准的设计规范条文表达方式^[7];尽管 BIM 技术的发展与普及为设计审查提供了丰富信息,但仍不能支持完整的设计规则检查需求^[38];规则的自动提取或解译^[2]、复杂空间关系分析推理^[43]、大规模规则检查等仍是重要难点,而我国在相关领域的探索才刚刚开始^[3, 6, 59]。具体来说,主要包括以下 3 大难点和问题:

(1) **信息模型异构及语义鸿沟:**当前有关研究仅选择消防、节能等个别细分领域进行应用和 BIM 模型的扩展。各不同细分领域信息模型的结构差异给研究成果的重用及整合带来了极大困难。与此同时,不同细分领域在设计规范表达、领域对象分类、应用需求等方面的差异进一步加大了信息模型结构的差异,同时也给不同领域专业人士理解某一概念的含义(即语义)带来了问题,造成专业领域之间的语义鸿沟。面临信息模型异构和语义鸿沟问题,亟需构建一种简单、灵活、统一的语义模型,规范不同专业领域的语义概念,兼容不同信息模型结构,为建筑工程全专业设计审查奠定基础。本体模型在该方面体现出了显著优势,被有关学者大量采用,已逐步成为设计审查领域通用语义模型构建的关键方案。

(2) **规则自动解译与开放共享:**当前设计规则检查有关研究和应用仍以人工规则编制为主,该方式具有灵活性低、工作量大等问题,难以适应建设领域设计规范不断演进、知识不断更新现状。因此,基于自然语言处理进行自动规则解译的研究才刚刚开始,仅能处理设计规范的部分内容。同时,也应注意到目前有关规范、标准均主要面向专业人员阅读,给计算机理解和处理带来很大问题,研究并构建考虑机器处理特点的规范及标准形式化模型也是未来的发展方向之一。最后,有关研究通常采用内部自定义格式进行规则管理,透明度和灵活性低,难以满足设计审查规则开放、共享和重用的需求。基于开放规则建模语言构建透明、灵活的审查规则表达及共享方法至关重要。

(3) **复杂空间关系分析与大规模推理:**作为当前 BIM 模型信息描述的主要形式,IFC 标准缺乏完善的构件空间关系、拓扑连通关系等信息的描述能力,难以满足逃生路径、空间布局等一系列设计规范检查的需求。目前有关自动设计审查的研究多局限于对构件属性、参数的检查,在复杂空间关系分

析检查方面尚显不足。此外,既有的研究均以小规模数据验证为主,在大规模、复杂规则及空间关系场景下的推理、检查研究尚属空白,难以满足实际大型复杂工程的设计审查需求。突破大规模、复杂规则及空间场景推理、仿真是未来设计审查进入实用化、自动化以及全面覆盖的关键难点之一。

参考文献(References)

- [1] TAN X, HAMMAD A, FAZIO P. Automated code compliance checking for building envelope design[J]. *Journal of Computing in Civil Engineering*, 2010,24(2):203-211.
- [2] ZHOU P, EL-GOHARY N. Ontology-based automated information extraction from building energy conservation codes[J]. *Automation in Construction*, 2017,74:103-117.
- [3] 田明阳. 基于BIM与CBR的消防安全自动规则审查与设计决策支持系统[D]. 中国成都:西南交通大学,2018.
TIAN M Y. Automatic rule checking and design decision support system for fire protection design based on BIM and CBR[D]. Chengdu, China: Southwest Jiaotong University, 2018. (in Chinese)
- [4] 傅智敏. 我国火灾统计数据数据分析[J]. *安全与环境学报*, 2014,14(06):341-345.
FU Z M. Statistics of fire disasters in China[J]. *Journal of Safety and Environment*, 2014,14(06):341-345. (in Chinese)
- [5] 陈志波. 浅谈建筑消防审查中的常见问题[J]. *门窗*, 2013,9:101.
CHEN Z B. Discussion on common problems in compliance checking for fire design[J]. *Window and Door*, 2013,9:101. (in Chinese)
- [6] 余君, 陈涛, 王静, 等. 局部自动化的消防设计审查方法应用研究[J]. *消防科学与技术*, 2017,36(4):559-561.
YU J, CHEN T, WANG J, et al. Semi-automatic rule-based checking for examination of fire safety code[J]. *Fire Science and Technology*, 2017,36(4):559-561. (in Chinese)
- [7] DIMYADI J, AMOR R. Automated building code compliance checking--where is it at[C]// *Proceedings of the 19th CIB World Building Congress*. Brisbane, Australia, 2013.
- [8] DELIS E A, DELIS A. Automatic fire-code checking using expert-system technology[J]. *Journal of computing in civil engineering*, 1995,9(2):141-156.
- [9] EASTMAN C, LEE J, JEONG Y, et al. Automatic

- rule-based checking of building designs[J]. *Automation in construction*, 2009,18(8):1011-1033.
- [10] NAWARI N O. Automating codes conformance in structural domain[M]//*Computing in Civil Engineering* (2011). 2011:569-577.
- [11] SALAMA D M, EL-GOHARY N M. Semantic modeling for automated compliance checking[M]//*Computing in Civil Engineering* (2011). 2011:641-648.
- [12] SALAMA D A, EL-GOHARY N M. Automated compliance checking of construction operation plans using a deontology for the construction domain[J]. *Journal of Computing in Civil Engineering*, 2013,27(6):681-698.
- [13] DIMYADI J, AMOR R. Regulatory knowledge representation for automated compliance audit of BIM-based models[C]// *Proceedings of the 30th CIB W78 International Conference*. Beijing, China, 2013: 68-78.
- [14] SOLIHIN W, EASTMAN C. A knowledge representation approach in BIM rule requirement analysis using the conceptual graph[J]. *Journal of Information Technology in Construction (ITcon)*, 2016,21(24):370-401.
- [15] LEE Y, SOLIHIN W, EASTMAN C M. The Mechanism and Challenges of Validating a Building Information Model regarding data exchange standards[J]. *Automation in Construction*, 2019,100:118-128.
- [16] LI S, CAI H, KAMAT V R. Integrating natural language processing and spatial reasoning for utility compliance checking[J]. *Journal of Construction Engineering and Management*, 2016,142(12):4016074.
- [17] XU X, CAI H. Semantic Frame-Based Information Extraction from Utility Regulatory Documents to Support Compliance Checking[M]// *Advances in Informatics and Computing in Civil and Construction Engineering*. Springer, 2019:223-230.
- [18] SOLIHIN W. Lessons Learned from Experience of Code-Checking Implementation in Singapore[R]. Singapore: BuildingSMART, 2004.
- [19] KANNALA M. Escape route analysis based on building information models: design and implementation[D]. Helsinki, Finland: Helsinki University of Technology, 2005.
- [20] ZHANG J, EL-GOHARY N M. Semantic NLP-based information extraction from construction regulatory documents for automated compliance checking[J]. *Journal of Computing in Civil Engineering*, 2013,30(2):4015014.
- [21] HJELSETH E, NISBET N. Capturing normative constraints by use of the semantic mark-up RASE methodology[C]// *Proceedings of the CIB W78-W102 Conference*. Sophia Antipolis, France, 2011: 1-10.
- [22] LEE H, LEE J, PARK S, et al. Translating building legislation into a computer-executable format for evaluating building permit requirements[J]. *Automation in Construction*, 2016,71:49-61.
- [23] ZHANG J, EL-GOHARY N M. Automated information transformation for automated regulatory compliance checking in construction[J]. *Journal of Computing in Civil Engineering*, 2015,29(4):B4015001.
- [24] UHM M, LEE G, PARK Y, et al. Requirements for computational rule checking of requests for proposals (RFPs) for building designs in South Korea[J]. *Advanced Engineering Informatics*, 2015,29(3):602-615.
- [25] FORTINEAU V, THOMAS P. SWRL as a Rule Language for Ontology-Based Models in Power Plant Design[C]// *Towards Knowledge-Rich Enterprises Product Lifecycle Management*. Berlin, Heidelberg, Springer, 2012: 588-597.
- [26] PARK S, LEE H, LEE S, et al. Rule checking method-centered approach to represent building permit requirements[C]// *Proceedings of the 32nd International Symposium on Automation and Robotics in Construction*. Oulu, Finland, 2015.
- [27] ZHONG B, GAN C, LUO H, et al. Ontology-based framework for building environmental monitoring and compliance checking under BIM environment[J]. *Building and Environment*, 2018,141:127-142.
- [28] ZHANG S, BOUKAMP F, TEIZER J. Ontology-based semantic modeling of construction safety knowledge: Towards automated safety planning for job hazard analysis (JHA)[J]. *Automation in Construction*, 2015,52:29-41.
- [29] ZHONG B T, DING L Y, LUO H B, et al. Ontology-based semantic modeling of regulation constraint for automated construction quality compliance checking[J]. *Automation in Construction*, 2012,28:58-70.
- [30] YURCHYSHYNA A, ZARLI A. An ontology-based approach for formalisation and semantic organisation

- of conformance requirements in construction[J]. *Automation in Construction*, 2009,18(8):1084-1098.
- [31] DIMYADI J, CLIFTON C, SPEARPOINT M, et al. Computerizing regulatory knowledge for building engineering design[J]. *Journal of Computing in Civil Engineering*, 2016,30(5):C4016001.
- [32] İLAL S M, GÜNAYDIN H M. Computer representation of building codes for automated compliance checking[J]. *Automation in Construction*, 2017,82:43-58.
- [33] MARTINS J P, MONTEIRO A. LicA: A BIM based automated code-checking application for water distribution systems[J]. *Automation in Construction*, 2013,29:12-23.
- [34] YANG Q Z, XU X. Design knowledge modeling and software implementation for building code compliance checking[J]. *Building and Environment*, 2004,39(6):689-698.
- [35] CHOI J, CHOI J, KIM I. Development of BIM-based evacuation regulation checking system for high-rise and complex buildings[J]. *Automation in Construction*, 2014,46:38-49.
- [36] MALSANE S, MATTHEWS J, LOCKLEY S, et al. Development of an object model for automated compliance checking[J]. *Automation in Construction*, 2015,49:51-58.
- [37] LEE J K, LEE J, JEONG Y, et al. Development of space database for automated building design review systems[J]. *Automation in Construction*, 2012,24:203-212.
- [38] SOLIHIN W. A simplified BIM data representation using a relational database schema for an efficient rule checking system and its associated rule checking language[D]. Georgia Institute of Technology, 2015.
- [39] BRAMER M. Logic programming with Prolog[M]. Springer, 2005.
- [40] PAUWELS P, Van DEURSEN D, VERSTRAETEN R, et al. A semantic rule checking environment for building performance checking[J]. *Automation in Construction*, 2011,20(5):506-518.
- [41] GHANNAD P, LEE Y, DIMYADI J, et al. Automated BIM data validation integrating open-standard schema with visual programming language[J]. *Advanced Engineering Informatics*, 2019,40:14-28.
- [42] HIETANEN J, FINAL S. IFC model view definition format[J]. *International Alliance for Interoperability*, 2006:1-29.
- [43] PREIDEL C, BORRMANN A. Automated code compliance checking based on a visual language and building information modeling[C]// *Proceedings of the 32nd International Symposium on Automation and Robotics in Construction*. Oulu, Finland, 2015.
- [44] PLUME J, MITCHELL J. Collaborative design using a shared IFC building model — Learning from experience[J]. *Automation in Construction*, 2007,16(1):28-36.
- [45] 邓亚. 三维建筑消防设计图纸审查系统的研究与实现[D]. 中国北京: 北京建筑大学, 2016.
- DENG Y. The Research and implementation of the three dimensional building fire design drawing review system[D]. Beijing, China: Beijing University of Civil Engineering and Architecture, 2016. (in Chinese)
- [46] ZHANG S, LEE J, VENUGOPAL M, et al. Integrating BIM and safety: An automated rule-based checking system for safety planning and simulation[C]// *Proceedings of the CIB W099*. Washington, US, 2011.
- [47] BALABAN O, KILIMCI E S Y, CAGDAS G. Automated Code Compliance Checking Model for Fire Egress Codes[C]// *Proceedings of the 30th eCAADe Conference*. Prague, Czech Republic, 2012.
- [48] JEONG J, LEE G. Requirements for automated code checking for fire resistance and egress rule using BIM[C]// *Proceedings of the ICCEMICCPM 2009*. Korea, 2009: 316-322.
- [49] SHIH S, SHER W, GIGGINS H, et al. Assessment of the Building Code of Australia to Inform the Development of BIM-enabled Code-checking Systems[C]// *Proceedings of the 19th CIB World Building Congress*. Brisbane, Australia, 2013.
- [50] CLAYTON M, FUDGE P, THOMPSON J. Automated plan review for building code compliance using BIM[C]// *Proceedings of the EG-ICE 2013 Workshop*. Vienna, Austria, 2013.
- [51] ZHANG J, EL-GOHARY N M. Integrating semantic NLP and logic reasoning into a unified system for fully-automated code checking[J]. *Automation in Construction*, 2017,73:45-57.
- [52] ZHANG S, TEIZER J, LEE J, et al. Building information modeling (BIM) and safety: Automatic safety checking of construction models and schedules[J]. *Automation in Construction*, 2013,29:183-195.
- [53] GETULI V, VENTURA S M, CAPONE P, et al. BIM-based code checking for construction health and

- safety[J]. *Procedia engineering*, 2017,196:454-461.
- [54] JIANG L, LEICHT R M. Automated rule-based constructability checking: Case study of formwork[J]. *Journal of Management in Engineering*, 2014,31(1):A4014004.
- [55] BEACH T H, REZGUI Y, LI H, et al. A rule-based semantic approach for automated regulatory compliance in the construction sector[J]. *Expert Systems with Applications*, 2015,42(12):5219-5231.
- [56] CHENG J C, DAS M. A BIM-based web service framework for green building energy simulation and code checking[J]. *Journal of Information Technology in Construction (ITcon)*, 2014,19(8):150-168.
- [57] NAWARI N O. A Generalized Adaptive Framework (GAF) for Automating Code Compliance Checking[J]. *Buildings*, 2019,9(4):86.
- [58] PAUWELS P, de FARIAS T M, ZHANG C, et al. A performance benchmark over semantic rule checking approaches in construction industry[J]. *Advanced Engineering Informatics*, 2017,33:68-88.
- [59] 吉久茂, 童华炜, 张家立. 基于 Solibri Model Checker 的 BIM 模型质量检查方法探究[J]. *土木建筑工程信息技术*, 2014,6(1):14-19.
- JI J M, TONG H W, ZHANG J L. Inquiry of the method of BIM model checking based Solibri Model Checker [J]. *Journal of Information Technology in Civil Engineering and Architecture*, 2014,6(1):14-19. (in Chinese)