

文章编号: 1673-9469 (2018) 02-0020-05

doi:10.3969/j.issn.1673-9469.2018.02.005

基于 IFC 标准的装配式建筑空间自组织建模方法研究

刘思铖, 张家春, 邓雪原

(上海交通大学土木工程系, 上海 200240)

摘要: 基于国际 IFC 标准, 研究装配式建筑构件的空间实时定位算法, 将微机电系统 (Micro-Electro-Mechanical System, MEMS) 传感器应用于建筑业, 对微机电系统传感器进行研究和开发, 借助 MEMS-IMU 记录装配式构件在安装过程中的空间位置和姿态变化数据, 结合已有的 BIM 构件库, 研究基于 IFC 标准的建筑信息模型自动生成算法, 以参数化获得最终 IFC 标准数据模型, 为装配式建筑竣工模型的自动生成奠定基础。

关键词: 建筑信息模型; IFC 标准; MEMS 传感器; 空间定位

中图分类号: TU17

文献标志码: A

Research on IFC-based spatial automatic modeling for prefabricated buildings

LIU Sicheng, ZHANG Jiachun, DENG Xueyuan

(Department of Civil Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai, 200240, China)

Abstract: Based on the IFC standard, this paper studies the real-time location algorithm of prefabricated components, utilizes IMU to record the location and attitude data of components in the process of installation and develops software and algorithm based on MEMS (Micro-Electro-Mechanical System) sensor. Combining the existing BIM component library, the automatic generation algorithm of building information model based on IFC standard is studied, and the final IFC data model is obtained by parameterization. it lays a foundation for automatic creation of as-built BIM of prefabricated buildings.

Key words: Building information modeling(BIM); IFC standard; Micro-Electro-Mechanical System(MEMS) sensor; spatial location.

随着土木建筑工程项目的规模越来越大, 建筑造型也越来越复杂, 不同专业、各方人员协同困难, 越来越多的工程项目期望使用或者正在使用 BIM 技术去集成、整合并分析建筑全生命周期的各种信息, 加强信息共享, 以便于对整个工程进行管理。同时, 随着装配式建筑在国内的推广, 越来越多的工程项目选择使用装配式技术来提高整体生产效率, 提升工程质量。目前, 国内外许多学者在装配式建筑和 BIM 技术结合方面做了不少研究^[1-3]。目前大部分模型自动生成研究都是基于三维激光扫描系统及图像重建技术的逆向工程^[4-10]。综合来说, 激光扫描及图像重建技术在建筑业中的研究及应用还处于初

级阶段, 虽然许多研究已取得阶段性进展, 但生成满足竣工交付要求的三维模型仍面临着很多技术挑战和实施困难。本文提出基于 IFC 标准的装配式构件空间定位方法, 通过研究 IFC 标准中构件信息表达方法, 结合构件位置及姿态捕捉算法, 可生成符合 IFC 标准的建筑信息模型。

1 基于 IFC 标准的构件空间定位算法

1.1 符合国际标准的构件表达

建筑项目构件种类繁多, 在模型建立初期就应该对构件命名规则进行细化约定, 规范项目参与人

收稿日期: 2018-01-02

基金项目: 十三五国家重点研发计划项目(2016YFC0702000; 2016YFC0702001)

作者简介: 刘思铖(1992-), 男, 河南郑州人, 硕士, 主要研究方向为基于 IFC 的自动建模技术。

员对项目的设计、修改等行为，提高数据交互效率，保证建筑信息模型数据质量。

建筑构件分类可借鉴北美地区广泛使用的 OmniClass^[11] 标准 Table 23-Products 中的分类方法，并在此基础上进行扩展，以对自组织生成模型中的构件进行命名。构件命名可根据装配式构件库中的构件基本信息按照预定规则自动生成并转为 Unicode 码，添加 IFC 文件实体属性 Name 字段。

IFC 标准采用 EXPRESS 语言描述^[12]，并定义其包含的所有数据信息，唐春风等^[13]阐述了 IFC 文件的一般结构和 EXPRESS 语言。IFC 标准技术架构分为 4 层，由上至下分别为：领域层、共享层、核心层、资源层。定义于核心层中的 IfcRoot 实体直接或者间接派生出资源层之外定义的所有实体。IFC 模型中的三种基本实体类型 (IfcObjectDefinition, IfcPropertyDefinition, IfcRelationship) 都是由 IfcRoot 派生而来，实体间的关系见文献 [14]Express-g 图。三维几何建模常用到的构件在 IFC 标准中对应的实体都由实体 IfcProduct 派生或其子类派生，IfcProduct 是对与几何或空间环境相关的任何对象的抽象表达，其子类通常设有形状表达和项目结构所涉及的对象坐标。

1.2 构件的空间定位

目前国内外对装配式建筑安装过程中构件定位的研究基本处于起步阶段，本研究需要测量构件的实时位置及姿态，再根据其几何外观等参数，在远端计算机上实时显示及监测安装进度，进一步可以实现信息化的进度、材料、设备管理等内容，提升管理水平，提高工程质量，最后生成能用于后期运维的建筑信息模型，所以需要实时跟踪并记录构件在安装过程中的各项数据，考虑到施工现场条件限制以及信号遮挡等问题，本研究采用航位推算，利用基于微机电系统的惯性测量单元 (Inertial Measurement Unit, IMU) 对装配式构件进行位置及姿态的追踪。

IMU 大多用在需要进行运动控制的设备，如汽车和机器人上，也被用在需要对姿态进行精密位移推算的场合，如潜艇、飞机、导弹和航天器的惯性导航设备等。相较于在现场使用 GPS 及微波定位等方法，其优点是体积小，抗冲击，可靠性高，寿命长，成本低，重量轻^[15]，且不受施工场地使用环境限制，抗干扰能力强。但其也存在测量误差会随着时间的推移而增大的不足，所以需要通过对一定的算法 (如

Kalman Filtering 算法) 来消除对应的误差，以得到满足系统需求的准确数据。

1.2.1 构件位置获取

一个 IMU 一般包含有三轴加速度计和三轴陀螺仪，加速度计用来检测物体三个独立轴向的加速度数据，陀螺仪用来测量物体角速度数据。由于 IMU 只能采集到原始的加速度和角加速度信号，而不能直接得到构件的位置和姿态数据，所以需要利用相关算法处理器原始信号，以得到所需的位置和姿态信息。对于物体的加速度信号，可以通过时域积分，将加速度值 a 对时间 t 积分，同时给定初始速度，可以得到加速度计的速度函数：

$$v(t) = \int_0^t a(t) dt = v^*(t) + v_0 \quad (1)$$

将式 (1) 再次对时间 t 积分，同时给定初始位移，得到加速度计在局部坐标系下的三轴位移：

$$r(t) = \int_0^t v(t) dt = r^*(t) + r_0 \quad (2)$$

式 (1)、(2) 中： $a(t)$ 为加速度计原始信号， $v^*(t)$ 为 $a(t)$ 的原函数， v_0 为初始速度， $r^*(t)$ 为 $v(t)$ 的原函数， r_0 为初始位移。

由于所测量的构件不能被看作空间中的一个质点，而加速度计测量的加速度数据仅仅是固连在自身上的坐标系中的数据，所以测得的数据并不是世界坐标系中的数据，这就需要进行进一步的坐标变换处理。此时就需要借助陀螺仪记录的方向参数。

1.2.2 构件姿态获取

陀螺仪的使用和加速度计类似，它通过测量力矩计算角速率，通过角速率积分得到角度变化。一般建模过程中都会设置一个世界坐标系 (World Coordinate System, WCS)，需要求得的数据为构件在世界坐标系下的绝对姿态，而固连在 IMU 上的坐标系可视为局部坐标系，假定局部坐标系和世界坐标系的初始位置重合，从世界坐标系到局部坐标系的变换可以用欧拉旋转或者四元数旋转等方式表达，为表达更加方便直观，这里选择用欧拉角表达变换过程，不妨设旋转次序为 x - y - z ，三个欧拉角为 α 、 β 、 γ ，则从世界坐标系 P_w 到局部坐标系 P_l 的变换为

$$P_l = C(\gamma) C(\beta) C(\alpha) P_w \quad (3)$$

其中坐标旋转变换矩阵为

$$C(\alpha) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\alpha & \sin\alpha \\ 0 & -\sin\alpha & \cos\alpha \end{bmatrix}, C(\beta) = \begin{bmatrix} \cos\beta & 0 & -\sin\beta \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin\beta & 0 & \cos\beta \end{bmatrix}$$

$$C(\gamma) = \begin{bmatrix} \cos\gamma & \sin\gamma & 0 \\ -\sin\gamma & \cos\gamma & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

则从局部坐标系数据求世界坐标系数据只需求式(3)的逆变换,即:

$$P_w = C^{-1}(\alpha)C^{-1}(\beta)C^{-1}(\gamma)P_l \quad (5)$$

不难看出沿轴旋转变换矩阵的逆矩阵即为绕坐标轴旋转一个相反的角度,即可得式(5)的等价公式:

$$P_w = C(-\alpha)C(-\beta)C(-\gamma)P_l \quad (6)$$

由于篇幅有限且误差处理及补偿算法较为复杂,在此不做论述。至此已经求得某个构件在世界坐标系的空间位置及姿态。

1.2.3 符合 IFC 标准的构件空间定位表达

获取了构件空间位置及姿态数据,下一步就是将这些数据用符合 IFC 标准的语句表达出来。在 IFC 标准中,构件位置通过 IfcObjectPlacement 实体表达,它是定义对象坐标系的一种抽象父类,对于每个有形状表达的产品都需要提供 IfcObjectPlacement。构件坐标表达形式有相对坐标、绝对坐标和网格三种,本研究采用相对坐标表达,由 IfcProject 表达项目的世界坐标系统,其下层的 IfcSite 包含了该场地的单一地理参考点的定义(使用 WGS84 坐标系统定义的经度、纬度及海拔),IfcBuilding、IfcBuildingStorey 等位置均以其上层坐标系作为参考坐标系,以此表达自身的局部坐标系位置。采用此种表达方法也更容易和前文所述的 IMU 采集到的数据结合。

由于 IFC 标准规定每个 IFC 文件有且仅有一个 IfcProject 实体,而可以包含多个 IfcSite 等实体,所以每个构件实体需要通过 IFC 位置表达语句层层嵌套,最终关联到 IfcSite 实体的坐标系。此过程中最重要即获取当前局部坐标系在上层坐标系中的表达。由于 IFC 表达中一个坐标系需要原点坐标、Z 轴和 X 轴向量确定,其中原点可以通过 IMU 数据解算,以得到现有构件坐标系在上层坐标系中的坐标原点 $(r_1 \ r_2 \ r_3)$, Z 轴和 X 轴参考方向需要根据 IMU 数据解算得到的姿态转角进行变换得到。默认局部坐标系的 Z 轴坐标为 $(0 \ 0 \ 1)^T$, X 轴坐标为 $(0 \ 0 \ 1)^T$,则局部坐标系 Z 轴、X 轴在上层坐标系中的向量表达即为

$$\begin{bmatrix} z_1 \\ z_2 \\ z_3 \end{bmatrix} = C(-\alpha)C(-\beta)C(-\gamma) \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{bmatrix} = C(-\psi)C(-\theta)C(-\varphi) \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (7)$$

则该构件的局部坐标系表达即为

$$\text{IFCCARTESIANPOINT}((r_1, r_2, r_3));$$

$$\text{IFCDIRECTION}((z_1, z_2, z_3)); \text{IFCDIRECTION}((x_1, x_2, x_3))。$$

2 基于 IFC 标准的空间自组织建模

2.1 自组织建模整体流程

基于国际 IFC 标准,以 NMBIM 软件(上海交通大学 BIM 研究中心自主研发协同平台)为基础平台,使用 Visual C++ 开发装配式建筑构件自组织建模软件。

整个自组织建模软件分为测量单元,传输单元,模型生成单元三大部分,各个单元之间协同工作流程见图 1,主要步骤如下:

- (1) 装配式构件吊装前,通过 BIM 构件库^[6]获取构件几何信息、材料信息、属性信息等基本信息,同时将这些基本信息读入缓存;
- (2) 将测量单元贴附在构件表面特定位置并将测量单元初始化,开始构件吊装;
- (3) 模型生成单元根据接收到的数据在建模平台实时显示安装进程;
- (4) 某一构件安装完成,根据最终位置及构件信息,在数据库中生成安装完成的构件信息相对应的信息记录,同时拆下构件上的测量装置,进行下一个构件的吊装;
- (5) 所有构件安装完成,保存安装过程中的数据文件至数据库,根据选项生成对应的 IFC 物理文件。

2.2 IFC 模型文件的自动生成

IFC 文件分为文件头 Header 和数据 Data 部分,输出 IFC 文件前先根据预定义信息初始化文件头部

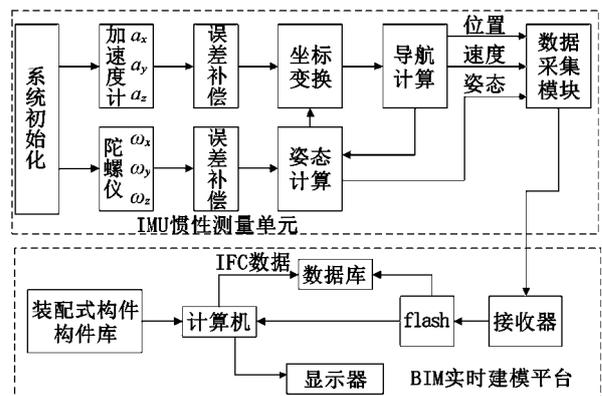


图 1 装配式建筑构件自组织建模流程
Fig.1 Automatic modeling process of prefabricated members

分，记录与整个交换文件结构有关的信息。接下来向数据缓冲区输出个人和组织信息定义、归属历史等所有 IFC 文件都需要含有的通用实体信息等，紧接着根据外部数据资料实例化 IfcProject 实体，确定其相关属性及其几何环境表达、项目单位定义等信息。实例化完成一些必要的实体后，创建 IfcSite、IfcBuilding、IfcBuildingStorey 及其它 Element 实体的实例，同时也在各个实例构造函数中做好相关实体

信息关联，同时根据逻辑判断，在生成相关实体实例的时候要创建相关实体间的关系实例。

在完成所有实体数据信息实例的创建后，对容纳所有实例的容器进行遍历，最后一步即关联一个文件流对象，将上述容器内的所有实例通过算法转化为文本，输出到磁盘文件中，最后调用 IFC 文件校验工具，生成校验日志，整个流程图见图 2。

2.3 案例验证

根据前文所述的模型生成流程，在实验室验证整个系统的可行性。本系统可以自定义项目信息或者根据已有 IFC 模型数据解析项目信息，在原有 IFC 模型基础上继续添加新的装配式构件。本例采用已有的 IFC 模型数据，对该模型右上角的构件进行模拟吊装。

在实验室中，将 IMU 测量装置粘贴在构件下表面，并对测量装置进行初始化，开始装配式构件的吊装，在实验室对一根模拟柱子进行移动，在移动的过程中，构件定位装置会一直记录加速度信号和角度信号数据，完成吊装后对 IMU 元件采集到的数据进行解析，得到解析后的位置和姿态数据，如图 3 所示。图 3 分别展示了本软件输出的 IMU 采集到的 X、Y 轴原始加速度信号图像（限于篇幅，图中只展示原始加速度信号图像，未展示时域积分后的速度和位移信号图像）和最终数据解析结果。

之后依据构件库中相应构件的数据信息，参数化添加一根柱子位置和姿态数据使用图 3 中解析到的数据。最后进行下一个构件的安装，待所有构件安装完毕，导出 IFC 模型数据（本例只添加一根柱子作为示意）。

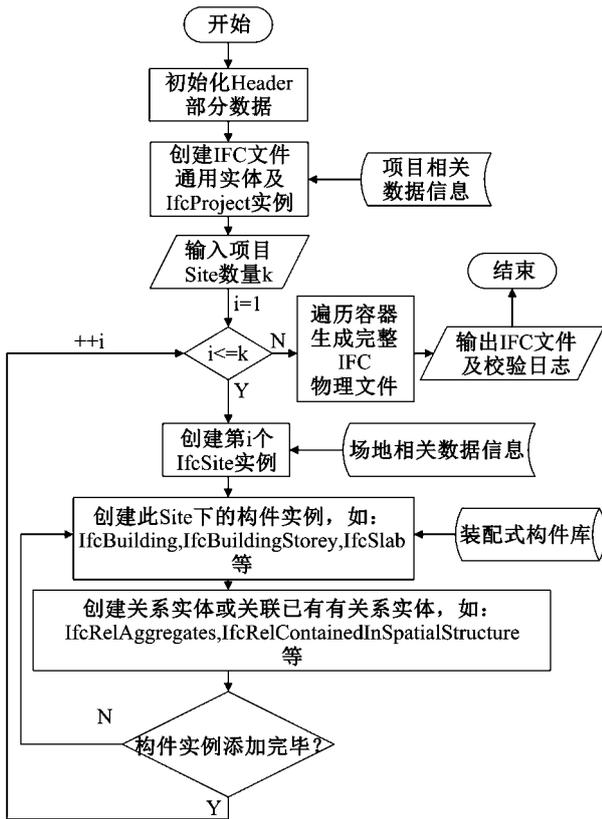


图 2 IFC 模型文件生成流程
Fig.2 The generation process of IFC file

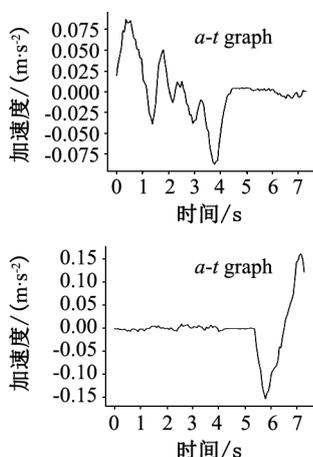


图 3 实验室模拟结果
Fig.3 The result of simulation in lab

表 1 实验结果和误差分析

Tab.1 Experimental result and the analyses of error

	位置			姿态		
	实际位移/m	计算位移/m	误差/m	实际角度/°	计算角度/°	误差/°
X轴	2.2	2.286	0.086 (3.9%)	0	0.29	0.29
Y轴	-1.2	-1.127	0.073 (6.1%)	0	-0.16	-0.16
Z轴	0	-0.077	-0.077	60	60.06	0.06 (0.1%)

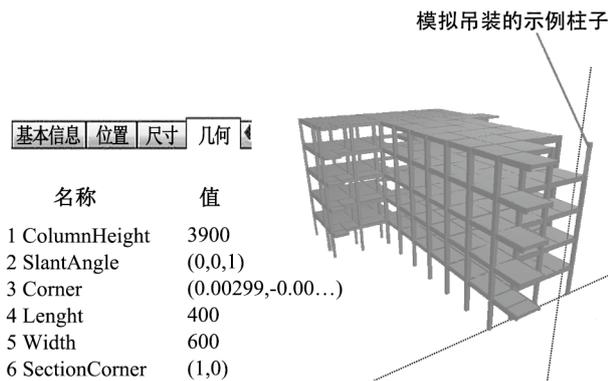


图 4 新添加构件位置及姿态结果展示

Fig.4 Display of position and attitude results of new column

最终结果如图 4 所示,在构件树中选中新添加的名为 test_column 的柱子,可以看到其几何信息、材料信息、位置及其它属性信息。实验过程数据误差如表 1 所示,误差基本控制在 7% 以内。IMU 惯性单元存在漂移问题(本方案采用的 IMU 惯性单元的零偏为 1.0 mg,零偏稳定性为 $\pm 1.5 \text{ mg}/^\circ\text{C}$),若采用精度更高的 IMU 惯性单元,误差将进一步减小。

3 结论

本文通过对微机电传感器及 IFC 标准的研究,提出基于 IFC 标准的装配式构件空间定位算法,对 MEMS 传感器追踪到的构件移动过程数据进行自动化处理,借助数值积分算法,将加速度和角加速度信号进行时域积分,得到构件移动的三轴位移和三轴转角,实现构件的实时定位。然后结合已有 BIM 构件库,研究和开发了基于 IFC 标准的建筑信息模型生成软件,为装配式建筑竣工模型的生成提供一种新的思路和方法。

参考文献:

- [1] 于龙飞, 张家春. 基于 BIM 的装配式建筑集成建造系统[J]. 土木工程与管理学报, 2015, 32(4): 73-78.
 [2] 常春光, 吴飞飞. 基于 BIM 和 RFID 技术的装配式建

筑施工过程管理[J]. 沈阳建筑大学学报: 社会科学版, 2015(2): 170-174.

- [3] 许杰峰, 鲍玲玲, 马恩成, 等. 基于 BIM 的预制装配建筑体系应用技术[J]. 土木建筑工程信息技术, 2016, 8(4): 17-20.
 [4] SCHWALBE E, MAAS H G, SEIDEL F. 3D building model generation from airborne laser scanner data using 2D GIS data and orthogonal point cloud projections[J]. Proceedings of Isprs Wg Iii/3 Iii/4 V/3 Workshop on Laser Scanning, 2005, 36: 12-14.
 [5] PU S, VOSSelman G, WG C V. Extracting windows from terrestrial laser scanning[C]// International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. 2007: 3-52.
 [6] BAUER U, POLTHIER K. Generating parametric models of tubes from laser scans[J]. Computer-Aided Design, 2009, 41(10): 719-729.
 [7] ZHANG C. A divide-and-conquer algorithm for 3D imaging planning in dynamic construction environments[C]// Icsc15 - the Canadian Society for Civil Engineering's, International/ Construction Specialty Conference. 2015.
 [8] 路兴昌, 宫辉力, 赵文吉, 等. 基于激光扫描数据的三维可视化建模[J]. 系统仿真学报, 2007, 19(7): 1624-1629.
 [9] 梁艳. 基于近景图像序列的建筑物三维模型重建研究[D]. 南京: 南京师范大学, 2013.
 [10] TANG P, HUBER D, AKINCI B, et al. Automatic reconstruction of as-built building information models from laser-scanned point clouds: A review of related techniques[J]. Automation in Construction, 2010, 19(7): 829-843.
 [11] OmniClassTM. A Strategy for Classifying the Built Environment[EB/OL]. (2013-08-25)[2017-08-29] <http://www.omniclass.org/>.
 [12] ISO 10303-11-2004. Industrial automation systems and integration-product data representation and exchange-Part 11: Description methods; The express lang-(下转第 30 页)

合理可行,可以为工程设计提供参考。

参考文献:

- [1] 陈宝春, 季 韬, 黄卿维, 等. 超高性能混凝土研究综述 [J]. 建筑科学与工程学报, 2014, 31(3): 1-24.
- [2] 王德辉, 史才军, 吴林妹. 超高性能混凝土在中国的研究和应用 [J]. 硅酸盐通报, 2016, 35(1): 141-149.
- [3] 应 铮. 钢管活性粉末混凝土直接轴拉性能试验研究 [D]. 福州: 福建农林大学, 2016.
- [4] 陈宝春, 牟廷敏, 陈宜言, 等. 我国钢-混凝土组合结构桥梁研究进展及工程应用 [J]. 建筑结构学报, 2013, 34(Z1): 1-10.
- [5] 吴庆雄, 黄育凡, 陈宝春. 钢管混凝土组合桁梁-格构墩轻型桥梁非线性地震响应分析 [J]. 工程力学, 2015, 32(12): 90-98.
- [6] ZHOU Xiaojun, MOU Tingming, FAN B K, et al. Mechanical properties and volume deformation of steel fiber reinforced micro-expansive concrete filled steel tube[J]. Applied mechanics & materials, 2012, 204-208: 4083-4087.
- [7] 李 靖. 钢管壁厚对钢管 RPC 轴拉性能影响的试验研究 [D]. 福州: 福建农林大学, 2017.
- [8] 姚鹏宇. 钢管-RPC 偏拉性能试验研究 [D]. 福州: 福建农林大学, 2018.
- [9] HUANG Wenjin, LAI Zhichao, CHEN Baochun, et al. Concrete-filled steel tube (CFT) truss girders: Experimental tests, analysis, and Design[J]. Engineering Structures, 2018, 156: 118-129.
- [10] HUANG Wenjin, FENU Luigi, CHEN Baochun, et al. Experimental study on joint resistance and failure modes of concrete filled steel tubular (CFST) truss girders[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2018, 141: 241-250.
- [11] HUANG Wenjin, LAI Zhichao, CHEN Baochun, et al. Experimental behavior and analysis of prestressed concrete-filled steel tube (CFT) truss girders[J]. Engineering Structures, 2017, 152: 607-618.
- [12] 谢志涛, 孙 涵, 黄文金. 细长钢管混凝土构件混凝土应变测试 [J]. 河北工程大学学报: 自然科学版, 2014, 31(1): 13-16.
- [13] 田志敏, 张想柏, 冯建文, 等. 钢管超高性能 RPC 短柱的轴压特性研究 [J]. 地震工程与工程振动, 2008 (1): 99-107.
- [14] LUO Hua, YAN Zhigang, AN Mingzhe. Finite element analysis of RPC-filled steel tube stub columns[J]. Advanced material research, 2011, 189-193: 1906-1909.
- [15] 邹慧辉, 陈万祥, 姜 猛. 钢管 RPC 柱的力学性能及极限分析研究现状 [J]. 混凝土, 2016(2): 29-33.
- [16] 黄文金, 盛 叶, 张正宾, 等. 钢管-钢纤维活性粉末混凝土界面黏结强度试验研究 [J]. 建筑结构学报, 2017, 48(Z1): 502-507.
- [17] HAN Linhai, HE Shanhu, LIAO Feiyu. Performance and calculations of concrete filled steel tubes (CFST) under axial tension[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2011, 67(11): 1699-1709.
- [18] LI Wei, HAN Linhai, CHAN TakMing. Tensile behaviour of concrete-filled double-skin steel tubular members[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2014, 99: 35-46.
- [19] HUANG Wenjin, ZHANG Zhengbin, HUANG Qingwei, et al. Experimental study on mechanical properties of RPC-FST under direct tension load[C]// Proceedings of 1st International Conference on UHPC Materials and Structures: Changsha, China, 2016: 236-246.

(责任编辑 王利君)

(上接第 24 页) uage reference manual [S].

- [13] 唐春风, 刁 波, 王利锋. IFC 文件的一般结构和 EXPRESS 语言介绍 [C]// 全国工程建设计算机应用学术会议. 2004: 450-455.
- [14] buildingSMART. Industry Foundation Classes Version 4 - Addendum 2[EB/OL]. (2016-07-15)[2017-09-03]. http://www.buildingsmart-tech.org/ifc/IFC4/Add2/html/annex/annex-d/ifckernel/diagram_0001.htm.

annex/annex-d/ifckernel/diagram_0001.htm.

- [15] 李荣冰, 刘建业, 曾庆化, 等. 基于 MEMS 技术的微型惯性导航系统的发展现状 [J]. 中国惯性技术学报, 2004, 12(6): 88-94.
- [16] 周洪波, 施平望, 邓雪原. 基于 IFC 标准的 BIM 构件库研究 [J]. 图学学报, 2017(4): 589-595.

(责任编辑 王利君)