

[文章编号] 1003—4684(2019)03-0065-04

# 基于工业机械臂的异形墙体数字化建造实验

邹贻权, 严梓瑞

(湖北工业大学土木建筑与环境学院, 湖北 武汉 430068)

[摘 要] 近十年以来, 先锋建筑师逐步引入机械臂到建筑设计和建造领域中, 旨在贯通建筑从虚拟数字化到现实数字化建造的全过程, 并在此全新的设计建造过程中集成新的设计方法。本次建造实验采用热线切割保温泡沫、夹取工具三维空间定位的方式, 充分利用机械臂六轴联动的高机动性、高精准性的优势进行实验, 初步探索通过数字设计技术到人机协作空间建造构筑物的可能性。

[关键词] 数字化建造; 机械臂; 标准构件

[中图分类号] J59

[文献标识码] A

## 1 人机协作建造实验

### 1.1 实验背景

20 世纪 90 年代末, 大批量定制化生产模式的出现满足了被工业标准化所忽视的个性化需求, 同时人们试图利用数字建造技术使批量定制生产能够像标准化预制一样经济<sup>[1]</sup>。随着近年来我国对可预制装配式建筑的推广, 批量定制的相关研究受到普遍关注。

苏黎世联邦工业大学(ETH)在《The Robotic Touch》书中展现了 2005—2013 年对机械臂在建筑构造、批量定制等多种应用研究, 开创了机械臂介入建筑设计与建造的先河。近年来, 国内外知名建筑学院如哈佛、MIT、康内尔、清华、同济等大学均开设了数字建造设计的课程, 对这一领域进行探索。

“数字化建造”是用数控工具对新材料的操作, 是一种全新的“自主性”设计建造方法<sup>[2]</sup>。当下, “数字化”建造领域的研究主要集中在三种建筑构件实体建造实验之中, 第一种是利用数控设备预制不同形态的混凝土模块进行浇筑; 第二种是针对数控设备和材料的特点, 采用自设的建构逻辑直接将数字化设计成果转化为精准的数控代码传输给数控设备从而完成数字化建造; 第三种则是利用数控设备对已经成型的复杂曲面进行分块式加工建造。本次数字化建造实验属于第二种类型的研究。

异形曲面形态的建造是当今建筑设计与建造领域的难题, 主要由于大型异形曲面难以定位与安装。机械臂建造方式可以很好地解决这一问题。

### 1.2 实验目标

湖北工业大学在华中地区高校中第一个引进了机械臂等相应设备, 为本次异形墙体数字设计与建造实验提供了硬件设施支持。

本次人机协作建构实验旨在提出新的设计可能性, 尝试使用机械臂对批量生产的标准化构件进行人与机械臂的互动搭建, 从而通过数字化建造的方式来探索全新的机器人建造模式, 并且验证机械臂建造技术对异形曲面建造的实际可能性。

### 1.3 方案构思

此次建造实验的设计主题是基于标准构件条件下的异形墙体, 建筑被认为是可以完全数字化的(理想状态下), 正如计算机中一切的代码都能由信息最小单位“bit”构成, 我们也可以将构成建筑的基本微粒——砖块看作“bit”, 在设计师提前设定的规则与组合方式下, 自动化地快速组合、增值、扩展, 形成建筑结构形态。方案设计中运用了这种思想, 将每一块泡沫砖看作“bit”, 在代码控制下由机械臂大批量快速生产形状相同或规则相似的砖块。

设计时充分考虑到实际建造材料与场地, 采用的材料为泡沫砖并将每个“bit”的尺寸定为 150 mm×75 mm×50 mm, 异形墙体尺寸定为 3500 mm×

[收稿日期] 2019—01—15

[第一作者] 邹贻权(1973—), 男, 湖北公安人, 湖北工业大学教授, 研究方向为数字建筑设计

[通信作者] 严梓瑞(1992—), 男, 湖北宜昌人, 湖北工业大学硕士研究生, 研究方向为数字景观设计

1025 mm×1300 mm。确定单位砖和整体异形墙体尺寸后设定 NURBS 曲线逻辑利用 Grasshopper 生成完整形体样式,设计逻辑为:

1)根据 NURBS 曲线放样出墙体整体造型(图 1)。

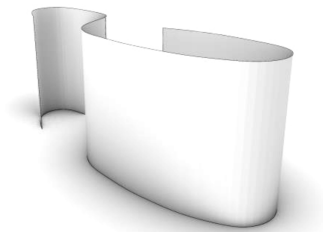


图 1 曲线放样

2)以偶数层点插奇数层点空位规则在生成的曲面上取点(图 2)。

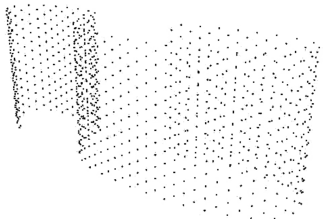


图 2 曲面取点

3)以生成的点为中心点生成矩形,矩形长边方向与中心点在曲面上的水平切线方向一致(图 3)。

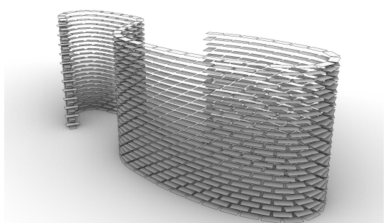


图 3 点生形

4)用灰度图片进行干扰,调整每一块砖的旋转角度并增加砖体厚度(图 4)。在此逻辑下得到了最后的异形墙体形态。

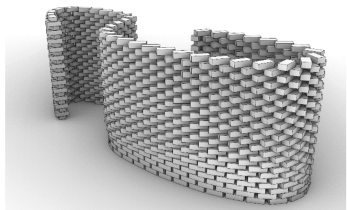


图 4 图片干扰成形

2 建造过程

2.1 机械臂运行的编程与模拟

本次异形墙体是由人机协作而成,原材料为 600 mm×600 mm×600 mm 的泡沫砖,机械臂首先要做的工作即是热线切割批量生产 150 mm×75

mm×50 mm 的标准砖块。生产足够量的标准砖块后再利用机械臂和夹取工具进行三维空间定位。KUKAR120R2700 型机械臂的 6 个工作轴在空间中有位移极限:A1(-185,185)A2(-150,-10)A3(-120,160)A4(-350,350)A5(-125,125)A6(-350,350)(单位:cm),在此工作范围内机械臂可以实现各种姿势的摆放。与传统设计和施工的不同是,整个机械臂的施工流程需要设计师在方案设计的过程中直接模拟优化。在此过程中设计师必须反复使用 KUKA | PRC 插件对机械臂的动作流程和机械臂限位状况等等进行模拟并修正(图 5)。

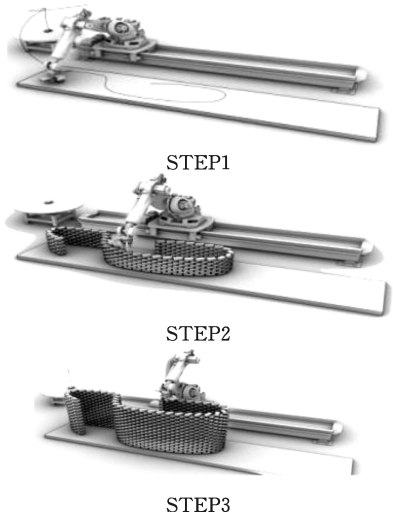


图 5 模拟机械臂运行

在 Grasshopper 的编写中,会搭建一个完整的程序框架(图 6),目的就在于设定机械臂对每一块砖的抓取与摆放时的工作状态,通过滑动设定的滑条可以模拟每一块砖抓取和摆放的工作过程。这个阶段重点在于模拟机械臂的整个运动流程,避免自身限位碰撞、工具碰撞等问题。具体编程逻辑为:

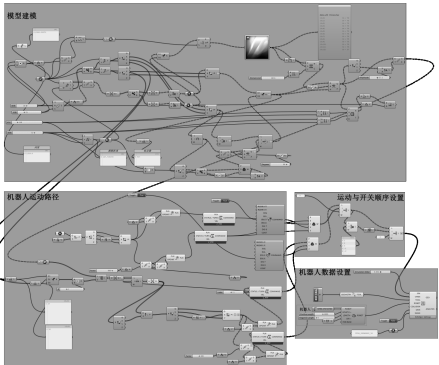


图 6 异形墙体搭建的 Grasshopper 程序图

1)取出每一块砖块中心点,以该中心点定义平面,使平面 x 轴方向与砖块长边方向一致。

2)将平面进行编号,从底层往上,编号依次增大(图 7)。

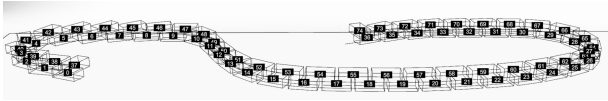


图 7 标准砖体编号

- 3)取出第一层平面向  $z$  轴方向移动一个距离作为机械臂操作的安全距离。
- 4)在抓取台面上定位一平面,作为机械臂抓取砖块位置,同样设定安全距离。
- 5)将 3、4 步骤中生成的平面按照正常抓取方式进行排序。
- 6)机器人设置,抓取设置。
- 7)通过 KUKA|PRC 转译程序变为 KUKA 运行语句(图 8)。

```
!ACCESS RVP
!SEL
!PARAM TEMPLATE = C:\KRC\Robot\Template\vorgabe
!PARAM EXTNAME = "
DEF DTUB_ZHUSHOU_01()

:FOLD IN
:FOLD BASSTECH IN
:GLOBAL INTERRUPT DECL 3 WHEN STOPPRESS==TRUE DO R_TOPRM()
:INTERUPT ON 3
:BAI (SPINTEV2)
:(ENDFOLD (BASSTECH IN)
:(ENDFOLD IN)

:FOLD (COMPOSITION - BASE IS 3, TOOL IS 2, SPEED IS 40%, POSITION IS A1 B4Z -120A3 120A4 B4S 0A6 0E1 0E2 0E3 0E4 0
:SEWSTART = FALSE
:FOAT ACT = DVL 40ACC 100ADU D100
:FOAT ACT = (TOOL NO 2BASE NO 3)PO FRAME #BASE)
:BAI (PTP PARAMS 40)
:PTP (A1 B4Z -120A3 120A4 B4S 0A6 0E1 0E2 0E3 0E4 0)
:(ENDFOLD

:FOLD (LIN SPEED IS 2 m/min, INTERPOLATION SETTINGS IN FOLD
:SWITCH=2
:SADVANCE=3
:(ENDFOLD

PTP (EPOK X -51.83, Y -1930.9, Z 1443.201, A -180, B 0, C 180, E1 0, E2 0, E3 0, E4 0, S 0 010) C PTP
SOUTH=TRUE
PTP (EPOK X -51.83, Y -1930.9, Z 1443.201, A -180, B 0, C 180, E1 0, E2 0, E3 0, E4 0, S 0 010) C PTP
PTP (EPOK X 2051.78, Y -235.11, Z 443.83, A -114.155, B 0, C 180, E1 0, E2 0, E3 0, E4 0, S 0 010) C PTP
PTP (EPOK X 2051.78, Y -235.11, Z 443.83, A -114.155, B 0, C 180, E1 0, E2 0, E3 0, E4 0, S 0 010) C PTP
SOUTH=FALSE
PTP (EPOK X 2051.78, Y -235.11, Z 443.83, A -114.155, B 0, C 180, E1 0, E2 0, E3 0, E4 0, S 0 010) C PTP
PTP (EPOK X -51.83, Y -1930.9, Z 1443.201, A -180, B 0, C 180, E1 0, E2 0, E3 0, E4 0, S 0 010) C PTP
PTP (EPOK X -51.83, Y -1930.9, Z 1443.201, A -180, B 0, C 180, E1 0, E2 0, E3 0, E4 0, S 0 010) C PTP
SOUTH=TRUE
PTP (EPOK X -51.83, Y -1930.9, Z 1443.201, A -180, B 0, C 180, E1 0, E2 0, E3 0, E4 0, S 0 010) C PTP
PTP (EPOK X 1974.257, Y -394.099, Z 443.83, A -102.647, B 0, C 180, E1 0, E2 0, E3 0, E4 0, S 0 010) C PTP
PTP (EPOK X 1974.257, Y -394.099, Z 443.83, A -102.647, B 0, C 180, E1 0, E2 0, E3 0, E4 0, S 0 010) C PTP
SOUTH=FALSE
```

图 8 转译后的 KUKA 运行程序

- 8)输送给 KUKA 机器人进行建造。
- ### 2.2 人机协作建造过程

在机械臂实际的建造过程中,人机分工协作是重点。整体异形墙体搭建的基本方法与机械臂运动程序的指导原则是通过机械臂的精准定位让协作者对砖块进行打胶并固定,以便于机械臂搭建墙体。

搭建异形墙体的第一步是将 600 mm×600 mm×600 mm 的泡沫砖切割成 150 mm×75 mm×50 mm 的标准砖块。标准砖块制作完成后进入人机协作的核心工作:针对每一个标准砖块进行打胶并固定在相应的位置上,运行指令驱动机械臂到取料台抓取砖块,并沿设定运动路径将砖块放到设定位置(图 9),通过胶粘方式使得每一块砖体粘接起来。



图 9 砖块打胶放置到物料台

整个墙体由 937 个标准砖体构成。建造全过程

全部以人机协作的方式完成,利用机械臂的精确性,可以近似真实的模拟出电脑三维模型,将每一块砖体准确无误地放在相应位置,通过这样的方式才能保证整个异形墙体结构的规律性和准确性,由此看来,使用人机协作的模式显得十分重要,通过人机协作的完美配合完成了最终的作品(图 10)。

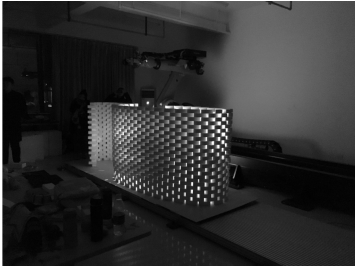


图 10 最终方案实景

### 3 讨论

当下,机械臂作为一种新型的科学技术植入于建造方式中,并不单单影响了建造方式,同时也产生了一种颠覆性的创作和设计方法。这种创作和设计方法与传统设计有着很大区别,它相当于一种媒介可以让建筑学专业与其他没有直接关系的专业关联起来;这样的多学科交叉更易于产生新的研究课题。例如同济大学袁烽教授的苏州木结构主题馆<sup>[3]</sup>、清华大学于雷教授机械臂 6A 仿生打印<sup>[4]</sup>也都实现了机械臂对构件的非标准化生产。他们正在帮助建筑师转变设计理念和建造方式,而未来“机械臂建造”方式会作为一种建造方法使得材料到物质化的设计过程变得更加容易。

《Translations from Drawing to Building and other Essays》中提出“转译”与“转换”之间的关系。Robin Evans 提出建筑设计是从一幅画转换而来的(即便当今已经实现无纸化设计工作),在转换过程中信息的传递无法得到精确表达,并且在精神层面容易受到很多干扰<sup>[5]</sup>。因此,建筑图纸能否真实的将建筑完全表现出来?能否真实地表达各种异形的空间形态?

机械臂技术通过人机交互,可以实现跨多个数量级和尺度的操作,并保持其稳定性和精确性。机械臂与参数化工具的结合可以直截了当的表达设计师的意图,脱离了图纸的僵化,使得设计过程更为自由与直接,创作的空间更大。

机械臂之所以能应用在建筑研究领域,得益于其自身的几个优势:高效、精确、可控性极强。本次实验采用的 937 个标准构建完全由机械臂在 2 个小时切割而成,且整个搭建过程持续 4 个小时,体现了机械臂的高效性;同时,每一个单元体的转动角度都

不同,最后搭建出来的作品与设计时的样式几乎一模一样,体现了机械臂的精确性;整个过程完全按照设计时的路径,体现了机械臂极强的可控性。

虽然机械臂建造在当下还没有被充分利用,且存在一些实际施工的问题,但在不久的将来机械臂建造模式一定能在未来建筑项目中有所体现。

[参 考 文 献]

[1] Standard for performance-rated cross-laminated timber;

ANSI/APA PRG 320-2012[S]. Tacoma: APA—The Engineered Wood Association, 2012.

[2] 袁烽.从数字化编程到数字化建造[J].时代建筑,2012,29(5):10-21.

[3] 袁烽,柴华.机械臂木构工艺[J].西部人居环境学刊,2016,31(6):1-7.

[4] 于雷.交集亦或补集——关于机械臂参与下的数字建构自主性讨论[J].建筑学报,2014(8):32-35.

[5] Robin Evans. Translation from drawings to building and other essays[M]. The United States: The MIT Press, 1997: 153-192.

# Digital Construction Experiment of Special-shaped Wall based on Industrial Manipulator

ZOU Yiquan, YAN Zirui

(School of Civil Engin.,Architecture and Environment ,Hubei Univ. of Tech.,Wuhan 430068,China)

**Abstract:** In the past ten years, pioneer architects have gradually introduced robotic arms into the field of architectural design and construction, aiming to penetrate the entire process from virtual digitalization to realistic digital construction, and to integrate new design methods in this new design and construction process. The present construction experiment, adopting the method of hot-line cutting thermal insulation foam and three-dimensional spatial positioning of the gripping tool, makes full use of the advantages of high maneuverability and high precision of the six-axis linkage of the robot arm. It preliminarily explores the possibility of constructing structures by means of the human-machine cooperation space through digital design technology.

**Keywords:** digital construction; manipulator; standard components

[责任编辑:裴 琴]