

建筑机器人：当今应用方式，未来发展前景



Alberto Balzan



Claudia Cabrera Aparicio



Dario Trabucco

摘要

近年来，机器人技术强势进入大量工业领域，尤其是汽车、制造、航空和农业领域，对产业、劳动和技术政策以及各行业产品的发展形势产生了重大影响。建筑业是全球规模最大的行业之一，但在人们眼中，它仍是一个低科技含量、与现代科技脱节的环境。显然，建筑机器人的新阶段目前已经曙光初现，它无法以传统方式解读，也无法与同类行业比较。要响应当前的创新形势，实现适应建筑业需求的创新，一个关键步骤在于重塑和澄清概念，融入对“机器人”一词更为灵活的理解，以及对其未来潜力的明确分类和表述。本文所依据的研究旨在为建筑业和机器人工业之间的关系提供一个广泛的框架，并探索机器人技术在不久的将来对建筑业的改进蜕变可能发挥的作用。

关键词：建筑，机器人

作者

Alberto Balzan，研究助理
Claudia Cabrera Aparicio，研究助理
Dario Trabucco，研究经理
世界高层建筑与都市人居学会
Research Office, Iuav University of Venice
Dorsoduro 2206
Venice, 30123
Italy
电话：+39 041 257 1276
电子邮件：dtrabucco@ctbuh.org
CTBUH.org

Alberto Balzan 是一位注册建筑师，2017年以优异成绩毕业于威尼斯建筑大学。此前曾在芝加哥伊利诺伊理工学院(IIT)学习。他的论文主要研究智能动态外墙的应用潜力。Balzan热爱技术和创新，目前在威尼斯建筑大学CTBUH研究室工作，同时也是该校Dario Trabucco教授在“建筑构件和建筑技术”课程上的教学合作人。

Claudia Cabrera Aparicio 是一位建筑师，同时也是威尼斯建筑大学CTBUH研究室的研究助理。她于2018年获得马德里理工大学建筑学院(ETSAM)建筑学士和硕士学位，并曾通过交流计划及奖学金，于2015年在维也纳美术学院、2015-2016年在芝加哥伊利诺伊理工学院(IIT)学习。

Dario Trabucco 博士是CTBUH研究主管和意大利威尼斯建筑大学的研究员。他广泛参与高层建筑相关的教学和研究活动，包括高层建筑生命周期分析、服务中心设计以及高层建筑改造/翻新相关问题。2009年，他凭借题为“The Strategic Role of the Service Core in the Energy Balance of a Tall Building”（服务中心在高层建筑能量平衡中的战略作用）的论文获得建筑技术博士学位。



Schindler

本文概述了CTBUH研究项目“建筑业中的机器人技术”，该项目由迅达赞助。

完整的研究结果请参见CTBUH研究报告：《高层建筑建设施工中的机器人技术：制造和自动化领域的新前沿》。

详见第39页广告。

机器人技术在建筑行业中的应用方式

传统建筑施工过程的机器人化

本文遵循不同的基本原理，通过不同发展阶段和行业的采用情况，探讨了在建筑中应用机器人技术的两种主要趋势。

对于传统建筑施工过程的“机器人化”，有一种较为“古典”的解读，其原理是使用机器人机械装置执行传统建筑施工作业（见图1）。这些设备执行与传统作业人员相同的任务，取代或辅助传统作业人员从事枯燥、繁重的体力劳动。

在这一框架中，第一类发展趋势已从第一阶段以单纯重复建筑相关工作的目标朝当前趋势转变，即寻求自给自足程度越来越高的设备制造。

这些设备能够收集并处理数据，以求提高自身对工作环境的适应性，从而实现不间断工作。对于以配合传统作业人员工作为宗旨的协作型机器人，它们所需的复杂精巧程度，与其说是与它的自给自足程度相关，不如说是与它的人机交互的安全和通信问题更为紧密相连。在这种情况下，通过手势和自然语音翻译等手段，可以提高此类机器人的效用。



图 1. 传统建筑作业的机器人化可以延伸到结构装配（左上）、重复行为 [如铺砖（右上）和抹灰（左下）]，以及对危险或复合环境的检查，这也是 Spot 机器人一种可能的用途（右下）。这种地面机器人能够在工作环境中自主导航、携带检测设备并收集关键数据。

© 左上：苏黎世联邦理工学院；右上：苏黎世联邦理工学院 Gramazio Kohler Research；左下：Okibo；右下：网络峰会 (cc-by-sa)

数字化制造

第二种方式的基础在于形成完全由机器人执行的建筑施工过程，发现新的设计和建筑选择，孕育创新性的制造技术，从而彻底改变整个建筑行业。事实上，Scaled Robotics 公司首席执行官 Stuart Maggs 等多名专家认为，应当探索机器人在人力传统建筑作业之外的其他任务的可能性。

(Davies 等，2019)。按照这一思路，应当避免让机器人模仿传统作业以及使用针对人类作业而设计和改造的工具与材料。

正如苏黎世联邦理工学院 Fabio Gramazio 教授 (F. Gramazio, 私人通信, 2020 年 5 月 6 日) 所论证的那样，这种新思路不是要通过降低成本来改善建筑业，而是与创造新建筑类型紧密相关的，并支持可持续发展。在这个框架中，这种新的应用方式要解决在实现优化架构的过程中所隐含的成本增加问题。

Zaha Hadid 建筑事务所的高级合伙人、计算设计研究小组 CODE 的共同创始人 Shajay Bhooshan 确认，数字制造技术提供的多学科机会将有助于实现具有优化的复杂几何形状的高性能结构，其驱动因素包括节约材料、提高结构效率和环境性能 (Bhooshan, 私人通信, 2020 年 4 月 3 日)。尽管缺乏在复杂建筑项目中应用数字化制造的实际案例，但已经完成设计和建造的多个展馆和设施，已经彰显了这种数字技术的潜力 (见图 2)。

机器人施工带来的变化

对建筑相关职业的考虑和影响

关于未来机器人技术对就业的影响，人们看法不一，而最近将数字化制造技术应用于建筑工地的做法则使看法的不同更加凸显。国际机器人联合会 (IFR) 认为，制造过程自动化的做法已有几个世纪的历史 (例如自驱动机器或先进磨粉机的推出)，人类已经适应了这些变化，工作岗位也发生了演变，但这并不意味着工人会被取代且某些职业会消亡的担忧全无道理 (IFR 2018)。这些职业历经各种转变，尽管有的确实已经消失，但有的发生了变革，而为了全新自动化机制的融入，有的新职业被创造出来，并带来了巨大的需求。例如，自从大规模采用网络化办公计算后，行政助理的关键能力之一已经从任务管理转变为计算系统管理。

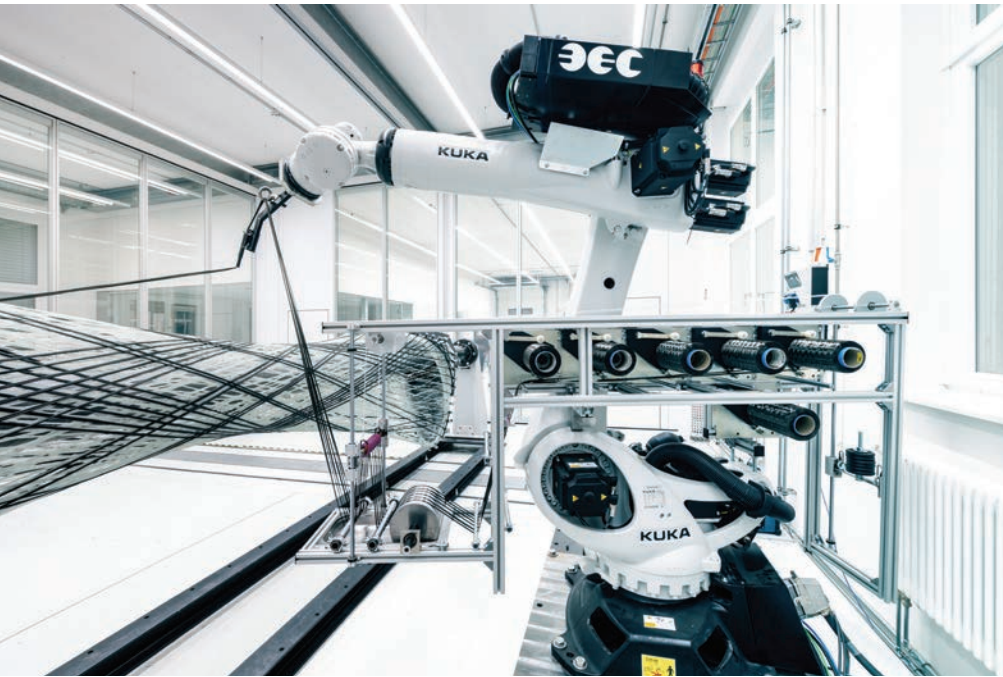


图 2. 在斯图加特大学计算设计与建筑研究所 BUGA 纤维展馆, 可以看到使用拉伸纤维和树脂进行纤维缠绕的增材技术。© 斯图加特大学 ICD/ITKE

IFR 列出了未来在工作环境中广泛运用机器人可能会对就业产生的一系列影响 (IFR 2017)。该组织提出, 自动化有责任催生新的商业模式 (IFR 2018), 既能提供新的商品和服务, 又能帮助现有公司吸收在建筑市场上展开竞争所需的变化, 从而提高效率和灵活性, 进而增强公司乃至国家的竞争力。顺着这一思路, Bessen (2016) 认为, 自动化并不一定意味着工作会消失, 考虑到“工作效率提高可能会降低价格, 从而增加产品需求, 抵消节约人力的影响”, 或者“提高一种职业的工作效率可能会导致其替代其他职业; 就业可能会向工作效率更高的新生职业转移”, 除非是在就业需求缺乏弹性, 因而意味着工作岗位流失的情况下, 才有所例外。

关于这一话题, 有必要详细阐述一个区别: “工作”不同于“劳动”。国际机器人协会坚持认为“机器人可以替代劳动, 但不会取代工作岗位”, 机器人的劳动可作为传统作业人员的补充和协助, 因此最终产生积极的影响 (IFR 2017)。多名研究人员承认, 到 2057 年, 接近一半的现有建筑行业岗位可能会被机器人替代 (Belton 2018)。

另一方面，支持将机器人纳入工作场所的人指出，只有少数中低技能的工作岗位会被取代，高技能工人的范围则会扩大，许多人会成为机器人操作员。许多专家一致认为，中等技术工人在很大程度上将被机器人取代，因此需要通过培训获得更多知识和能力，才能保证在高度技术化的新工作环境中保住工作岗位，从执行重复性任务转向监控为执行这些任务的机器人 (IFR 2017)。

如果将机器理解为“资本”，工厂里的传统作业人员则相应地成为流程中的“成本和误差因素”，而操作员经济实惠，不需要过多的专业培训。该领域的许多专家都将建筑环境中引入技术流程和机器理解为从技术角度对“工匠精神”的重新诠释，他们认为，机器人技术在行业中新的应用方式会带来新的“建筑工人”概念 (见图 3)。

这一理论引出了工匠控制整个生产流程而不只是参与其中的理念；可以追溯到工业革命前的工匠职业，赋予流程以自主性，赋予职能履行以专业性。例如，Gramazio (2020 年) 断言，机器人和人类之所以在自动化竞赛中互相排斥，是由关于自动化和人类劳动的历史观念导致的。Gramazio 提出了“数字工匠”，这一概念已存在于众多致力于以数字化方式生产和组装零件的公司中。这需要一个由熟练的人类操作员和机器组成的团队，这些人类操作员是跨越机器人和数字世界、物理和物质领域多个学科的专家。由此会催生出人与机器之间高效协作的工作流程，意味着建筑工地和利益相关者会完全转型，同时并不排除与传统体力劳动相结合。无论如何，数字制造相对来说尚不成熟，加之技术的内在复杂性、必然包含的工作以及产出成果本身，通常仍需要人类与机器人进行更加广泛的协作。

考虑到这些因素，是否真有可能实现人类劳动力的重新分配或技能提升？我们必须考虑到，并非所有人都有志于成为 IT 专家，也不是所有人都有能力从事高要求工作；如果机器人占据了他们的工作岗位，这些人就会失业。需要指出的是，归根结底，人类需要工作，要生存必须以业立身，因为有工作才有尊严。

为此，一些政治家和微软联合创始人 Bill Gates 等科技行业领导者建议设立一个税种，专门用于补贴工作岗位被机器人替代的人，并推动渐进而平稳的自动化过渡 (Waters 2017)。相反，IFR 认为开征“机器人税”并不能保证实现社会福利性国家，反而会遏制对机器人的投资 (IFR 2017)。但无论如何，大多数人都同意，政府需要从增加收入出发，在社会福利拨付的覆盖保障面上努力。

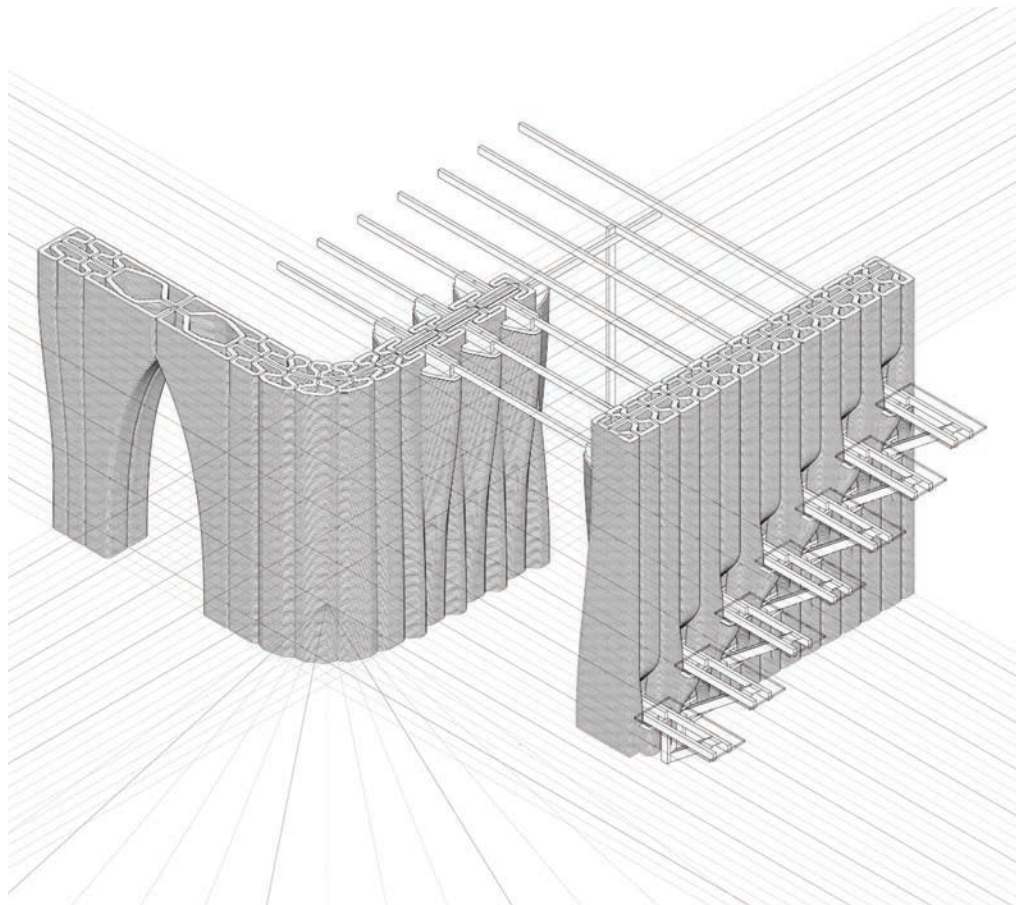


图 3. 如果人类把自己视为控制整个设计和生产流程的“数字工匠”，可能就会出现新的人类劳动角色和新的机器人生产结构。© WASP

“到 2026 年，非住宅建筑的数字化有望在全球范围内每年节约 10% 至 21% 的成本。”



图 4. Dusty Robotics 公司研发的 FieldPrinter 实现了机器人布局自动化，将 BIM 数据引入建筑现场。
© Dusty Robotics

其他补充技术的影响

从最初各个阶段到最后的建筑阶段，建筑过程中的沟通碎片化都是一大障碍。CTBUH 于 2020 年 7 月 1 日进行的一项由相关领域专家参与的调查结果显示，自动化推动建筑领域创新和生产效率的潜力，高度依赖于未来通过实施持续流程对多个建筑阶段信息进行的整合。高效的信息交流可提高准确性、加强实时决策，同时减少建筑流程最后阶段的不一致，从而缩短交货时间，减少材料损失。此外，到 2026 年，预计非住宅建筑的数字化可在项目不同阶段，有望在全球范围内每年节约 10% 至 21% 的成本（Castagnino 等，2016），这会降低机器人的成本。

要实施建筑信息建模 (BIM) 方法和新型软件应用，需要将机器人系统和设计软件集成在一个可以访问大型建筑知识数据库的中央平台上（见图 4）。对于设定利益相关者之间的早期协作和协调，以及精确的信息处置和交流，并最终实现机器人新

技术投资在经济上和技术上的可持续发展，这些技术都具有至关重要的作用。

除了融入这些技术，其他一些补充性的创新移动技术和云技术，包括数字孪生、5G、工业物联网 (IIoT)、云机器人、大数据、虚拟现实和增强现实 (VR 和 AR)、参数化设计、材料科学、机器视觉、机器学习等，都可以带来实质性的改变，有助于推动机器人技术在建筑环境中广泛应用（见图 5）(CTBUH 2020)。

目前，高度超过 200 米的建筑施工作业需要扩展网络和信号中继器，在这方面，5G 技术与 IIoT 解决方案可以共同实现高层建筑上的机器人控制，并提高机器人的自主能力和响应速度。这使得无需 Wi-Fi 基站即可在远程现场开展工作成为可能，也改善了云端设备之间的互联互通（Belton，2018），从而令云机器人技术照进现实：机器人可以将处理活动委托给

远程服务器，从而利用远程服务器的计算能力，不需要安装昂贵的机器人硬件和软件。

此外，管理人员能够监控并同步众多 IIoT 机器人在不同地点的活动；而设备将自行发布性能统计与执行预防性维护（Matthews，2019）。

最终，人工智能 (AI) 和由此衍生出的数据分析可能成为将机器人成功运用到建筑工地中的最后一块拼图 (Davies 等，2019)。

关于成功部署施工机器人的思考

缺点和驱动因素

纷繁多样的因素导致了建筑行业对机器人创新的缓慢吸收。除了待实现产品内在的复杂性外，建筑自动化的一大主要顾虑与众多可能影响建筑定制的变量有关。虽然几乎所有的工业产品都可以标准化，但建筑在规模、类型、文化、经济、法规等因素以及其他具体要求方面却千差万别。即使有些建筑物具有相同的特征，仍然可以通过许多其他的变化形式和因素将它们区分开来。

因此，试图将建筑业与任何其他与这一概念有关的行业类比，并应用相同的机器人化程序，很可能会失败。上世纪90年代日本“空中工厂”流产的案例就是如此：由于当时部件的技术水平不足，导致系统缺乏灵活性，无法充分适应不同的建筑环境。

其他行业与建筑行业的另一个重要区别在于，在其他行业中，流水线是按照产品移动的顺序排布的，而机器人则保持在固定位置。但在建筑中，输出（建筑）静止不动，机器人需要自主移动或由人工驱动到不同的地点。此外，建筑工地的环境条件与工厂的环境条件完全不同；前者还未完善结构，经常受到天气条件和其他不断变化的变量影响，而后者则是结构化的，处在高度的控制和规划之下。这些困难，再加上自动化设备和替代机器人技术成本高、某些新生机制不成熟、前期投资成本高、各利益相关方沟通过程中不顺畅以及需要建立新专业和工作小组等因素，都大大减缓了建筑机器人的市场发展速度。

与此同时，这些因素也使得该行业更倾向于预装配，并限制机器人的现场作业为装配。然则此举同样存在重要弊端，包括产生的污染以及因零件运输而增加的成本。

而从反面讲，推动这一领域向前发展的主要动机包括：追求提高安全、速度和精度，追求可持续性，以及机器人流程和个性化之间的协调；支持这些动机的因素包括大多数发达国家面临的传统熟练建筑工人数量减少和人口老龄化问题(见图6至图8)。

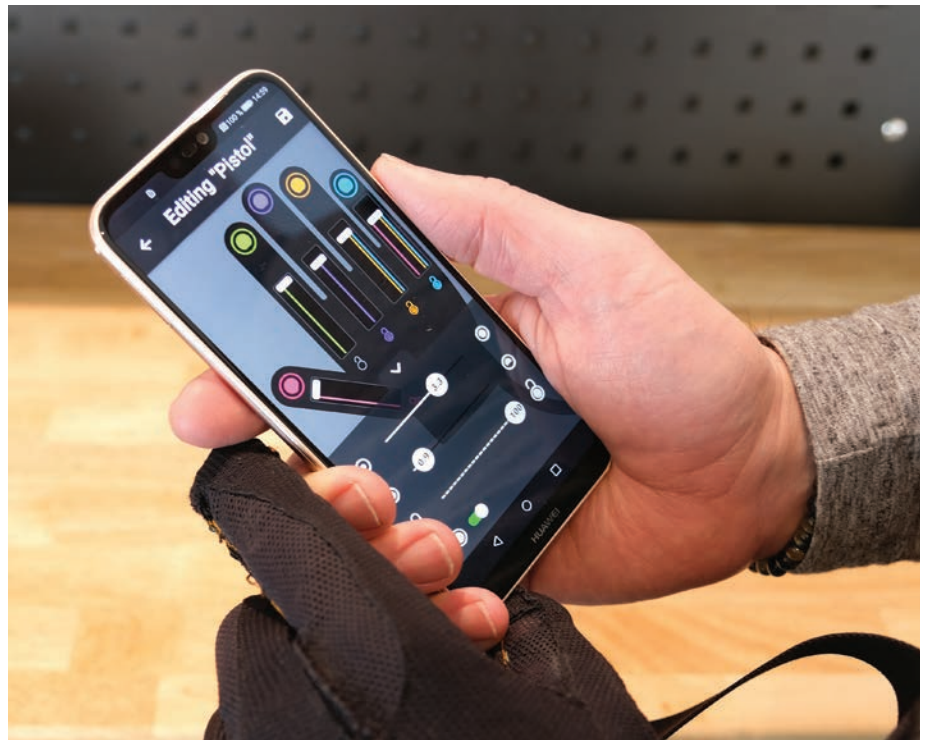


图5. IronConnect 数字界面允许用户调整外骨骼设置以营造更加个性化和舒适的体验，这能帮助用户适应可穿戴设备的使用。© Bioservo

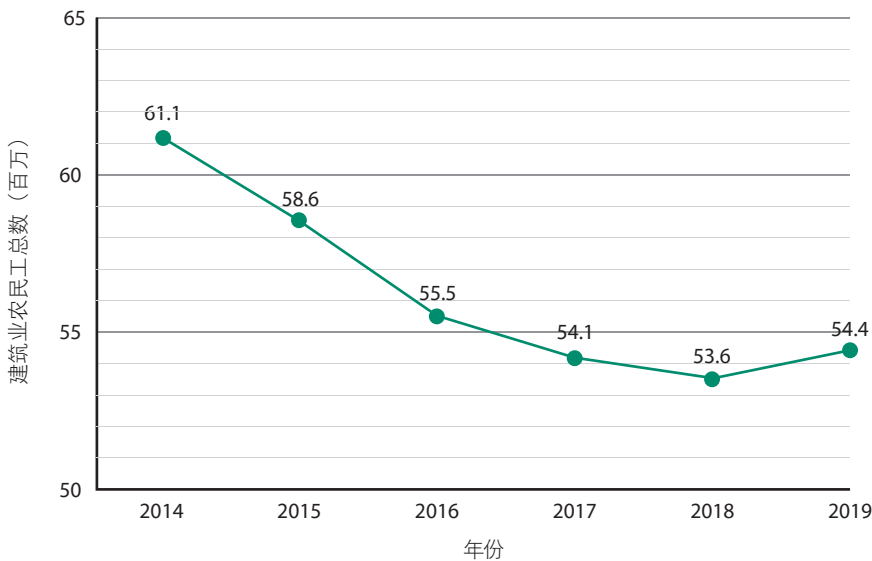


图 6. 2014-2019 年中国建筑业农民工总数。

来源：国家统计局，由 CTBUH 汇编并制图

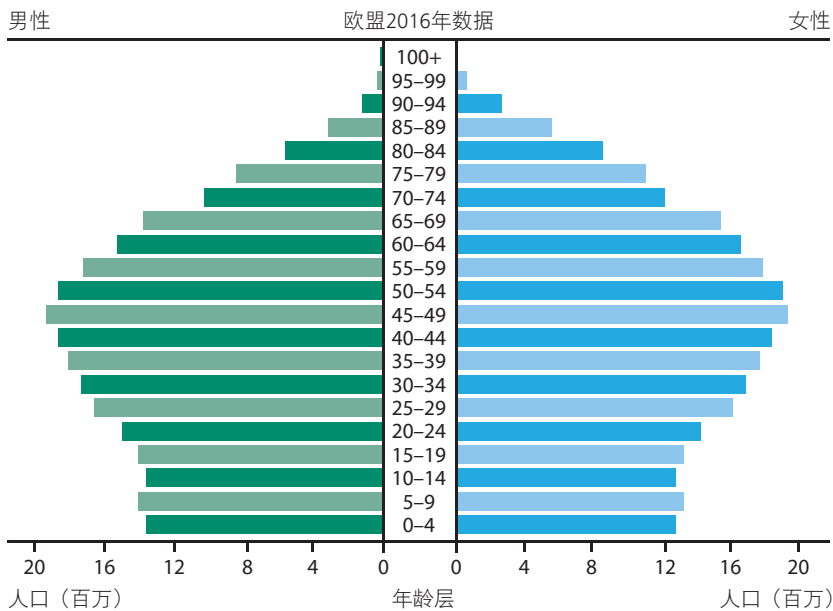


图 7. 2016 年欧洲不同性别和人群的年龄分布图，递增单位为 5 年。人口金字塔形状的变化表明，人口金字塔正向老龄化偏移，这可能对未来的建筑劳动力市场产生影响。

来源：美国中央情报局，由 CTBUH 重新制图

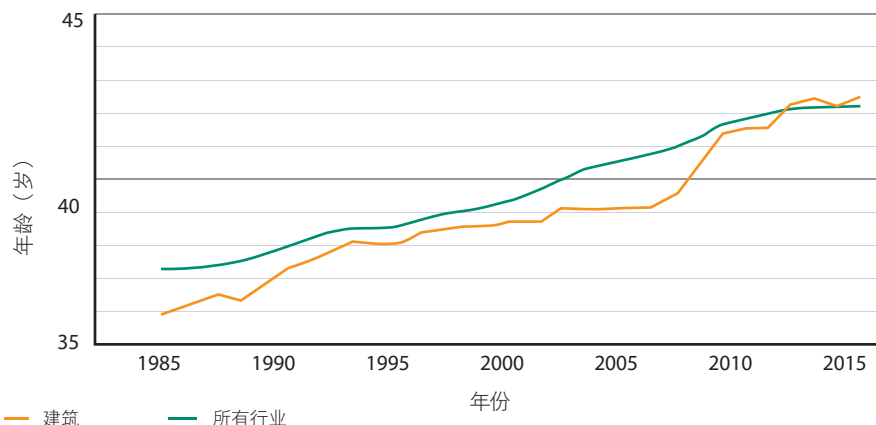


图 8. 1985-2015 年，美国建筑工人平均年龄与其他行业的比较。

来源：美国劳工统计局/CPWR 数据中心；由 CTBUH 重新制图。

全自动建筑工地

尽管人们对于实现方式各持己见，但都普遍认为机器人技术会在未来的建筑行业中发挥核心功能。大多数专家认同，离切实可行的建筑流程完全自动化还很遥远 (CTBUH 2020)。此外，有人认为，建筑行业中机器人自动化最大化并非最优方案，因为在接近最后阶段时成本会成倍增加。针对这一思路，Scaled Robotics 的首席技术官兼联合创始人 Bharath Sankaran 断言，这些设备所需的自主性和投资水平使得机器人替代人类劳动力根本称不上高盈利 (私人通信，2020 年 8 月 17 日)。

因此，根据 Gramazio (2020) 的说法，该因素会阻止投资者追求完全自动化，并推动他们转而寻求一个传统作业人员和机器的比例更均衡的工作环境。因此，必须在流程自动化的反转和成本与所取得的结果之间找到一个折中方案。Sankaran 认为，理想的自动化水平应确保广泛采用的建筑机器人 (STCR) 是为熟练执行某特定任务而开发的，具有成本效益且能执行更简单的单项任务 (见图 9)。

就这一点而言，危险的重复性远程作业最有可能实现自动化 (Davies 等 2019)；然而在很长一段时间内，传统作业人员仍将是建筑工地的重要资产，负责执行需具备特定技能的更复杂任务，可能会借助诸如外骨骼和智能眼镜等增强设备和技术，通过 AR 帮助推动他们的工作 (见图 10)。沿此思路，虽然由于现有技术尚不成熟，建筑机器人市场表现出尚未准备就绪的普遍态势，但也有少数设备在追求最大限度的自给方面表现出较高的复杂度，譬如电梯安装机器人“迅达 Schindler R.I.S.E” (见第 22 页)。



图 9. 这些单项任务机器人由 Shimizu 于 20 世纪 80 年代开发，执行钢结构防火喷涂等活动。© Shimizu Corp.



图 10. Bioservo Ironhand 可以降低工人在重复性工作中需要使用的抓握力。© Bioservo

现场和现场之外的有效应用

另一个反复出现的问题是机器人技术在现场外的应用和在现场应用的差距。对此，该领域的专家众说纷纭 (CTBUH 2020)。历史和文献表明，就传统的机器人化程序而言，自 20 世纪 70 年代以来就有将这些设备直接融入到建筑工地现场的尝试，但尚未产生预期的颠覆性影响。相反，在数字化制造方面，部分由于机器人技术尚处于发展初期，以及考虑到经济性和便利性的原因，到目前为止，对机器人技术的研究都是在现场之外进行的。初次测试在车间内进行，提供实验所需的结构化环境条件且进展迅速，并使试验人员一手掌控所有可能的变量 (见图 11)。为了让某些设备充分适应户外或非结构化的环境，以标准机械臂为例，对其进行改造或加上合适的装备实属必要之举。不过，现场应用实验也有开展，因为建筑行业数字制造的最终目标是能够直接在现场进行建设施工。这样可以避免运输精细繁琐的零件，而只需运输原材料。无论如何，考虑到某些数字化制造技术已经发展了至少 20 年，该领域专家认为，在可预见的未来，这种方案将得以在现场应用中利用和推广。

其中最有趣的想法之一，是在现场与现场外机器人的二元对立中引入另一种方案。这个概念就是“近场”建筑自动化，已有一些行动派将该概念付诸实施并改版优化，包括 MTC 的“盒中工厂” (Factory in a Box, FIAB) 和 Odico 的“极速工厂” (Factory on the Fly) (见图 12) (Søndergaard 等, 2020; MTC 2019)。其所依据的理念是将小型工厂单元引入施工现场，意味着可实现快速部署、远程管理和模块化制造。不是生产零件并交付到建筑现场，而是交付制造零件所需的机械。

这些方案的意义在于，在近场复制工厂稳定的环境条件，在更加可控的场景下生产零件，将误差降到最低，但同时又能保持随时随地生产零件的便利性，就地修正，实时响应，最终将相关程序纳入建筑设置工作流程。此外，由于靠近建筑工地，这些系统可以利用当地的材料、专门知识和技艺，为当地经济予以支持。

一种可能的未来前景是，通过灵活结合建筑流程中机器人的各种应用方式来实现协同效应，建筑行业专家都对此充满期待；这会在不同程度上发生，具体依赖于各个建筑项目的特定环境条件。在这一混合方案中，流程不再受到地点（现场、近场或现场外）或行为主体（机器人或人类）的限制，最终结果是不同程序组合在一起，每个程序都充分发挥自身潜力。这种任务分解，可以适应待处理项目的规模；对于类似工厂的现场外和现场流程，在大规模开发中效果最好，二者都专门用于大型部件。现场外生产负责处理大部分批量部件，而现场生产则专注于高价值部件。同时，在小规模的情况下才能实现最佳效果的数字化制造任务，则负责更密集的定制化方案。

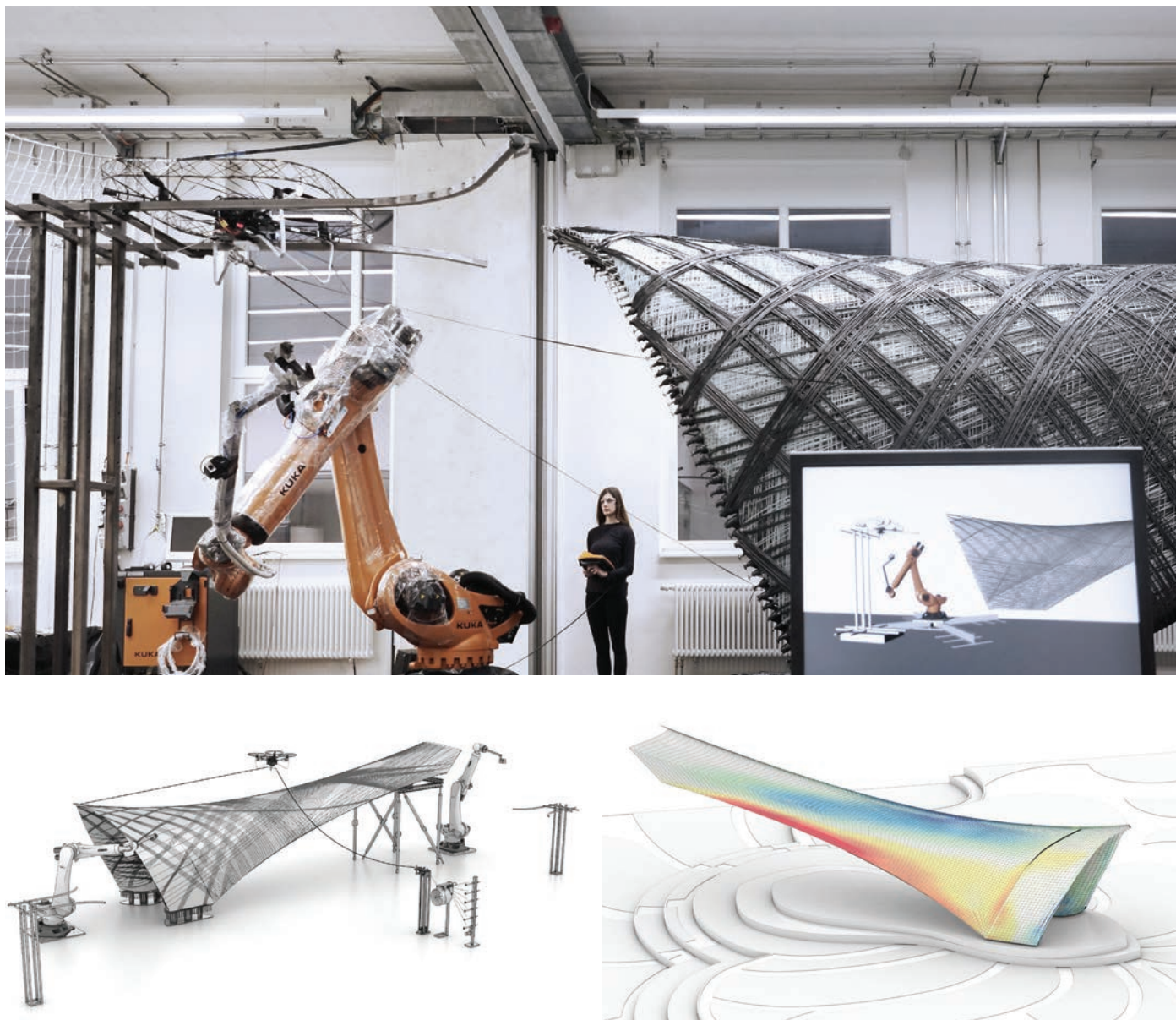


图 11. 斯图加特大学一间展馆的建造过程，通过平板设备控制，由机械臂和无人机操纵，在展馆中连续铺设一卷纤维。© 斯图加特大学 ICD/ITKE

“‘数字工匠’理论提出了一种理念，即由工匠在机器人技术的帮助下控制建筑的整个建造流程，而不只是参与其中一部分环节。”

实施时间框架

鉴于上述讨论，考虑到建筑行业的发展速度原本就较为缓慢，机器人技术不可能在近期内为建筑业带来根本上的改变。这将是一个缓慢而渐进、因势利导的过程。事实上，这样一个复杂的行业存在无数依存关系，不可能在一夜之间实施彻底的变革；此外，大型建筑公司往往与许多分包商合作，阻碍了自上而下的指令施行。因此，改变只可能通过有条不紊的小步骤来实现，这就需要文化层面的改变。

这种过程更容易让人联想到缓慢的改良而非革命，它需要一种“数字建筑文化”。Gramazio 强调，文化层面的改变通常需要时间，需要众多利益相关者共同参与，朝一个方向努力。就此而言，即使是建筑史上最重要的创新和里程碑，也需要很长时间才能被消化吸收（Bock 和 Langenberg 2014）。

为此，要完成这种改变，需要建筑公司和建筑代理公司共同努力。例如，据 Bhooshan (2020) 所述，Zaha Hadid 建筑事务所尝试通过向客户展示数字制造技术的效益，引发对数字制造技术的需求，并激活社会和文化层面的改变。

除了将机器人技术应用于建筑流程的技术问题外，还需要进一步开发和整合其他补充环节和技术，以实现对这一行业的真正提升，为可能的未来前景、转变以及当前瞬息万变的环境中其他诸多发展问题开辟道路。■

参考文献

Belton, P. (2018). “Why Robots will Build the Cities of the Future.” Accessed 22 January 2020. <https://www.bbc.com/news/business-46034469>.

Bessen, J. (2016). *How Computer Automation Affects Occupations*. Boston: Boston University School of Law.

Bhooshan, S. (2020). Personal Communication [Interview] (3 April 2020).

Bock, T. & Langenberg, S. (2014). “Changing Building Site—Industrialisation and Automation of the Building Process.” *Architectural Design* 84(3): 88–99. <https://doi.org/10.1002/ad.1762>.

Castagnino, S.; Rothballer, C.; Renz, A. & Filitz, R. (2016). “The Transformative Power of Building Information Modeling.” Accessed 24 January 2020. <https://www.bcg.com/publications/2016/engineered-products-infrastructure-digital-transformative-power-building-information-modeling.aspx>.

Council on Tall Buildings and Urban Habitat (CTBUH). (2020). *Robotics in Construction Survey*. s.l.:s.n.

Davies, R., Daniel, E., Christou, L. & Lo, C. (2019). “The Future of Robotic Construction: A Solution to the Industry’s Most Pressing Issues.” *Design & Build Review* 53. https://designbuild.nridigital.com/design_build_review_dec19/the_future_of_robotic_construction_a_solution_to_the_industry_s_most_pressing_issues.

Gramazio, F. (2020). Personal Communication [Interview] (6 May 2020).

International Federation of Robotics (IFR). (2017). “Robot density rises globally.” Accessed 15 November 2020. <https://ifr.org/news/robot-density-rises-globally>.

International Federation of Robotics (IFR). (2018). “Executive Summary World Robotics 2018 Industrial Robots.” Accessed 26 February 2020. https://ifr.org/downloads/press2018/Executive_Summary_WR_2018_Industrial_Robots.pdf.

Matthews, K. (2019). *How IIoT Will Change Robotics*. Accessed January 23, 2020, from <https://ubidots.com/blog/how-iiot-will-change-robotics>

Sankaran, B. (2020). Personal Communication [Interview] (17 August 2020).

Søndergaard, A.; Becus, R.; Rossi, G.; Vansice, K.; Attraya, R. & Devin, A. (2020). *Factory On The Fly: Exploring structural potential of cyber physical construction*. In: *FABRICATE 2020*. s.l.:UCL Press, pp. 92–99.

Waters, R. (2017). Bill Gates calls for income tax on robots. *Financial Times*, 19 February.

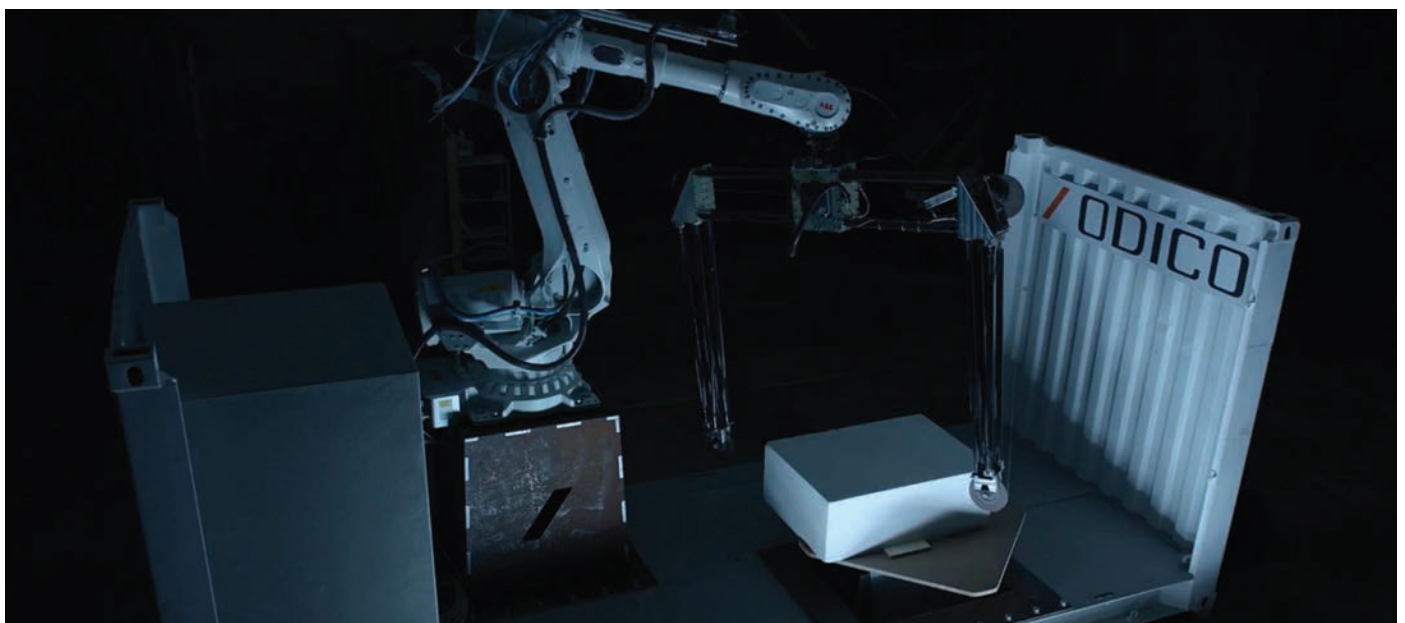


图 12. Odico公司的“极速工厂”是“近场”建筑自动化的一个例子；一间自给自足的小型工厂在交付现场附近生产零件。© Odico