arXiv:2603.03052v1 [cs.RO] 3 Mar 2026

建筑人机交互：迈向人-建筑交互中的机器人范式转变

Alex Binh Vinh Duc Nguyen
alexbvd.nguyen
@uantwerpen.be 安特卫普大学，安特卫普，比利时 鲁汶大学，鲁汶，比利时

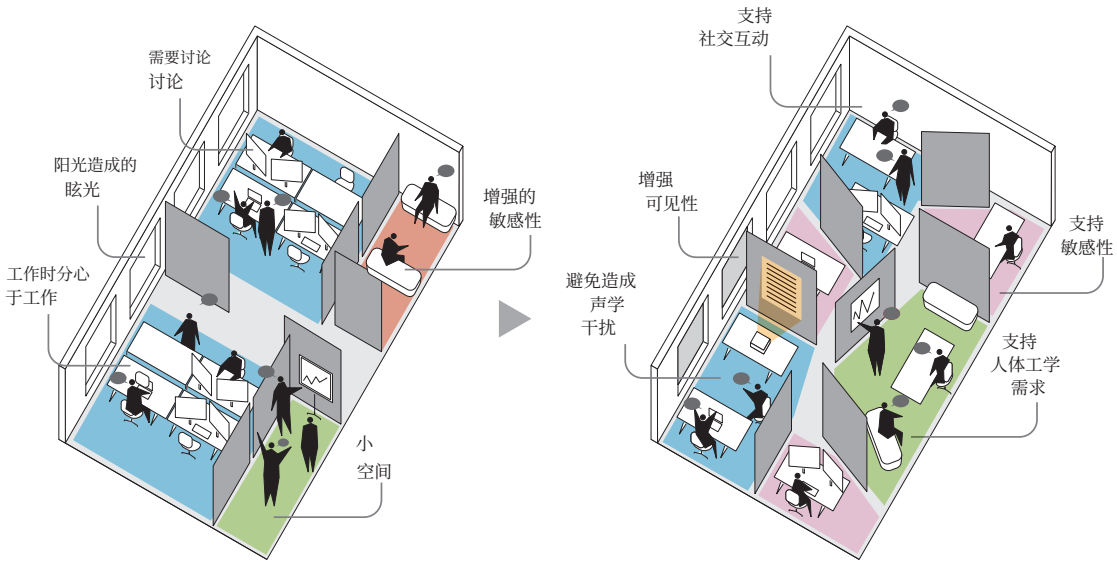

图1：HBI中的机器人范式转变设想建筑的多个层面协同工作，以满足共处一地的使用者的需求。在这个共享办公室示例中，这些层面包括移动机器人隔断（“空间规划”）和书桌（“家具”）、智能窗户遮阳系统（“建筑表皮”）以及智能照明（“建筑服务系统”）；它们根据多位使用者各自的需求和偏好，协调调整。

摘要

传感、通信、交互界面、控制和机器人技术的最新进展，正推动人-建筑交互超越适应性建筑服务系统和建筑立面，迈向建筑空间的实体驱动。与此同时，机器人家具、群体机器人学和形态变化空间领域的研究表明，建筑元素如今可以通过机器人技术增强，实现移动、重新配置和空间适应。我们认为，这些进展有望推动人-建筑交互发生范式转变：建筑的多个层面能够协同进行实体适应，以更全面地满足使用者需求和可持续发展目标。反过来，我们也认为，这一新兴范式为将人机交互领域的知识迁移至非常规机器人形态提供了理想案例，其中包括将机器人理解为多个建筑层，甚至理解为一栋建筑。然而，这一研究议程仍面临挑战，既有建筑人机交互在时间、空间和社会层面的复杂性，也有分散于人机交互、环境心理学、认知科学和建筑学等领域的知识鸿沟。因此，我们呼吁开展跨学科研究，统合建筑形态中机器人驱动的缘由、对象与方式。

关键词

人-建筑交互（HBI）、人机交互（HRI）、智能办公室、智能家居、机器人家具、建筑学、建筑机器人技术、交互式建筑、非拟人化机器人

1 人-建筑交互 （HBI）

近期的技术进步催生了新一代智能建筑系统。增强的传感、通信、交互界面和控制技术，如今使建筑与居住者之间能够实现全新的交互形式 [7, 10, 11]。人-建筑交互（HBI）领域研究这些进展，为建筑的构想、设计、建造、使用和管理提供指导，以改善居住者的生活与体验 [3, 6, 28, 35]。从历史上看，HBI研究一直聚焦于推进自动化建筑管理技术，重点是在保持热舒适度的同时降低能源消耗 [6]。这一重点促成了“自适应”建筑立面 [17, 31] 和智能建筑服务系统 [4, 34] 的开发，它们能够

根据居住者的活动、个性或偏好调节室内环境质量（IEQ）。

尽管取得了这些进展，近期的使用后评估却一再表明，许多居住者仍对其生活 [9] 或工作 [27] 空间感到不满。这种持续的不满源于居住者的空间需求高度依情境而变，会随着活动 [16] 而变化，并且同一空间中的不同个人之间也存在显著差异 [13]。然而，除了建成环境中的服务层和立面层之外，从结构到布局和家具的其他可变层大多仍是静态的，无法满足居住者动态且因情境而异的需求。

2 人机交互（HRI）

在建筑设计领域，适应性建筑研究如何利用数字技术和机器人技术，自动且自主地调整建筑空间，以满足居住者不断变化的需求。在过去五十年的研究中，该领域的先行者提出了各种理论宣言 [10] 和引人注目的装置作品 [26], ，展现了适应性布局不仅能够满足多种功能用途，还能营造引人入胜的建筑体验 [1, 18]的潜力。得益于近期的技术进步，适应性布局这一愿景已离现实更近。显然，越来越多的创新初创企业，如 Ori[1], 、Bey-ome[2], 和 Bumblebee[3]，如今正提供机器人解决方案，通过灵活地在常用位置与嵌于闲置区域的储物空间之间移动床或沙发等大型家具，优化公寓内的空间利用；这些闲置区域包括地板下方、天花板上方或划分空间的橱柜内部。

与此同时，人机交互（HRI）领域，尤其是机器人家具 [14, 15, 29], 的发展，有望通过在建筑尺度上对建成环境进行物理驱动 [7, 11]，开启一种新型的 HBI。群体机器人研究 [25],、机器人家具 [29], 以及形态变化空间 [12]的研究表明，椅子 [2], 、沙发 [30], 、长椅 [36], 、桌子 [32], 或墙壁 [21] 等日常建筑构件，如今都可以通过机器人技术加以改造，从而有目的地移动、改变形状，

或者重新排列成不同的空间布局，甚至向居住者做出能够表达意图的手势，以引导他们的行为。

3 建筑人机交互：迈向 HBI 的机器人范式转变

我们提出，近期的机器人技术进步有望促成HBI的范式转变，使建成环境的多个层面能够同步进行物理适应，以支持使用者需求，如图1所示。这一机器人范式转变使HBI有潜力以更整体的方式同时支持使用者需求与可持续发展目标。对空间布局和形态进行物理重构，不仅可以改变可见性和可达性等空间特性 [22], ，还可能通过引导气流或调控空间体量来影响整体IEQ。借助机器人驱动，HBI还可以在更细粒度的层面上运作，例如

[1]Ori：oriliving.com [2]Beyome：beyome.live [3]Bumblebee：bumblebeespaces.com

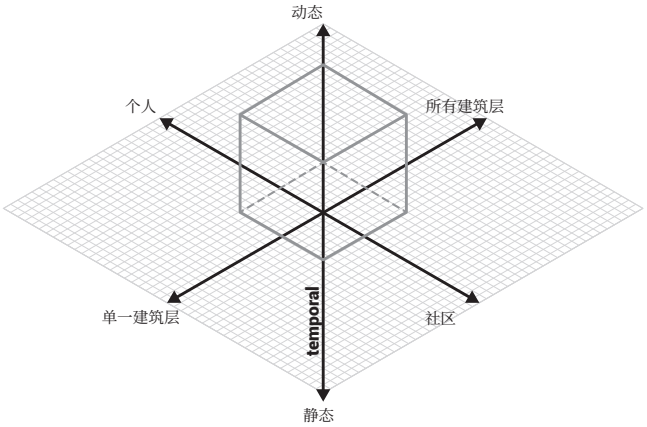

图2：“建筑人类交互”必须跨越三个维度：时间（**从静态空间到动态驱动**）、空间（**从单一建筑层到整栋建筑**），**以及**社会（**从个体居住者到整栋建筑的社群**）。

通过针对共处居住者的需求单独优化子空间 [5], ，或通过动态重新配置布局，以适应全天不断变化的活动 [20]。

反之，我们认为，HBI 中新兴的机器人范式是将人机交互知识迁移至非常规机器人形态的理想案例，即“机器人作为多个建筑层”，甚至“作为建筑的机器人”。我们的研究表明，这一视角为人机交互提供了另一种解读，不再仅关注人类与机器人的运动交互，也将其空间影响纳入考量 [5, 19, 36]。这种联系在 HRI 与 HBI 之间架起了一座桥梁，并可能推动机器人更无缝地融入日常环境。

尽管如此，这一研究议程仍面临若干尚待解决的挑战，尤其是由于“建筑人机交互”具有多面性，即人类与建筑形态中的机器人之间的交互必须跨越时间、空间和社会维度展开，如图2所示。例如，建筑人机交互既可能长期展开，也可能即时发生，因为建成环境既可以作为日常活动的静态背景，也可以作为自适应系统，及时响应使用者需求 [24]。建筑人机交互的空间尺度也可能差异很大，从单个建筑层、多个建筑层，到整栋建筑；每种尺度都会对个人、群体和社区产生不同的社会影响 [23]。

尽管近期研究已初步探讨了此类建筑人机交互应如何设计，但这些见解仍分散在多个学科领域，例如人机交互（HCI）、环境心理学、认知科学和建筑学等。由于这一范式转变需要将具有意义的机器人驱动融入实体建筑形态（**“为何”**），并通过软件或交互界面（**“何物”**）支持社会过程和人际互动（**“如何”**），我们呼吁开展跨学科研究，以考量技术、认知和环境因素之间复杂的相互作用 [6, 33]。

参考文献

[1] Henri Achten. 2013. 有态度的建筑：交互式建筑设计中的人格特质。载于计算与性能——第*31*届 *eCAADe* 会议论文集，第1卷。eCAADe，荷兰代尔夫特，477–485。https: // doi.org/ 10 52842 2013 1 477 . /conf.ecaade. . . Abhijeet Agnihotri 和 Heather Knight. 2019. 说服型椅子机器人：一项（大部分由机器人招募参与者的）实验。载于*2019*年第*28*届*IEEE*机器人与人类交互通信国际会议（*RO-MAN*）。IEEE出版社，印度新德里， 1 7 10 1109 46459 2019 8956262 – 。https://doi.org/ . / RO-MAN . . Hamed S. Alavi、Elizabeth F. Churchill、Mikael Wiberg、Denis Lalanne、Peter Dalsgaard、Ava Fatah gen Schieck 和 Yvonne Rogers. 2019. 人-建筑交互：研究计划的构想与基础。*Interactions* 26, 4（2019年6月），58–61。https://doi.org/10.1145/3330342 Muhammad Saidu Aliero、Muhammad Asif、Imran Ghani、Muhammad Fermi Pasha 和 Seung Ryul Jeong. 2022. 智能建筑系统综述分析：挑战与机遇。*Sustainability* 14, 5（2022）。https: //doi.org/ 10 3390 14053009 . /su Ozan Balcı、Stien Poncelet、Alex Binh Vinh Duc Nguyen 和 Andrew Vande Mo- ere. 2025. 利用两个移动式机器人隔断呈现建筑子空间，促进即兴办公室会议。载于*2025*年*CHI*计算系统中的人为因素会议论文集（*CHI '25*）。美国计算机协会，纽约州纽约市，美国，文章707，共16页。https://doi.org/ 10 1145 3706598 3714064 . / . Burçin Becerik-Gerber、Gale Lucas、Ashrant Aryal、Mohamad Awada、Mario Bergés、Sarah L Billington、Olga Boric-Lubecke、Ali Ghahramani、Arsalan Hey- darian、Farrokh Jazizadeh、Ruying Liu、Runhe Zhu、Frederick Marks、Shawn Roll、Mirmahdi Seyedrezaei、John E. Taylor、Christoph Höelscher、Azam Khan、Jared Langevin、Matthew Louis Mauriello、Elizabeth Murnane、Haeyoung Noh、Marco Pritoni、Davide Schaumann 和 Jie Zhao. 2022. 关于人-建筑交互研究的十个问题：改善生活质量。建筑与环境 226（2022），109681。https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2022. 109681 Henriette H. Bier. 2014. 机器人建筑。下一代建筑1, 1（2014），10 10 7564 14 8 。https://doi.org/ . / -NGBJ Stewart Brand. . 建筑如何学习：建成之后会发生什么。企鹅出版社。[9] Tao Chen、Dingbang Luh、Linhui Hu 和 Qian Shan. 2023. 基于使用后评估，探究影响老旧社区居住满意度的因素及可持续设计策略。*Sustainability* 15, 21（2023）。https://doi.org/ 10 3390 152115213 . /su Michael Fox. . 交互式建筑：自适应世界。编年史图书出版社，美国加利福尼亚州旧金山。[11] Keith Evan Green. 2016. 建筑机器人学：比特、字节与生物生态系统。麻省理工学院出版社，美国马萨诸塞州剑桥。[12] Jens Emil Grønbæk、Henrik Korsgaard、Marianne Graves Petersen、Morten Hen- riksen Birk 和 Peter Gall Krogh. 2017. 人际距离转换：为非正式会议设计可变形家具。载于*2017*年*CHI*计算系统中的人为因素会议论文集（*CHI '17*）。美国计算机协会，美国纽约州纽约市， 7029 7041 10 1145 3025453 3025487 – 。https://doi.org/ . / . Tianzhen Hong、Chien fei Chen、Zhe Wang 和 Xiaojing Xu. 2020. 共享办公室中的人-建筑交互与人格特质之间的关联。建筑与环境 170（2020），106602。https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2019. 106602 Wendy Ju 和 Leila Takayama. 2009. 亲和性：人们如何将自动门运动解读为手势。《国际设计杂志》3, 2（2009），77 86 574 262 – 。http://www.ijdesign.org/index.php/IJDesign/article/view/ / Enrico Di Lello 和 Alessandro Saffiotti. . PEIS桌：用于家庭环境的自主机器人桌。*Automatika* 52, 3（2011），244–255。https://doi.org/10.1080/00051144.2011.11828423 Casey M Lindberg、Karthik Srinivasan、Brian Gilligan、Javad Razjouyan、Hyoki Lee、Bijan Najafi、Kelli J Canada、Matthias R Mehl、Faiz Currim、Sudha Ram、Melissa M Lunden、Judith H Heerwagen、Kevin Kampschroer 和 Esther M Sternberg. 2018. 办公室工作站类型对身体活动和压力的影响。《职业与环境医学》75, 10（2018），689–695。https: // doi.org/ 10 1136 2018 105077 . /oemed- - Alessandra Luna-Navarro、Roel Loonen、Miren Juaristi、Aurora Monge-Barrio、Shady Attia 和 Mauro Overend. 2020. 使用者-立面交互：综述与分类体系。建筑与环境 177（2020），106880。https: //doi.org/ 10 1016 2020 106880 . /j.buildenv. . Mark Meagher. . 为变化而设计：响应式建筑的诗意潜能。《建筑学研究前沿》4, 2（2015），159–165。https: //doi.org/10.1016/j.foar.2015.03.002 Alex Binh Vinh Duc Nguyen、Jan Leusmann、Sven Mayer 和 Andrew Vande Moere. 2025. 通过协同设计即兴创作，引导出易于理解的建筑性手势，以用于机器人家具。载于*2025*年第*20*届*ACM/IEEE*人机交互国际会议（*HRI*）。569–579。https://doi.org/10.1109/ HRI61500.2025.10973858

[20] Binh Vinh Duc Nguyen、Jihae Han 和 Andrew Vande Moere。2022。迈向以场所为媒介的响应式建筑：关于自主移动机器人墙应如何以及何时调整空间布局的建议。美国计算机协会人机交互会议论文集6，CSCW2，论文第467号（2022年11月），27页。https://doi.org/ 10 1145 3555568 。/ Binh Vinh Duc Nguyen、Adalberto L. Simeone 和 Andrew Vande Moere。2021。通过半沉浸式交叉现实方法探索人-建筑交互的建筑框架。载于*2021*年美国计算机协会/电气电子工程师学会人机交互国际会议论文集（美国科罗拉多州博尔德）（*HRI '21*）。美国计算机协会，纽约州纽约，美国， 10 10 1145 3434073 3444643 页。https://doi.org/ 。/ 。Binh Vinh Duc Nguyen 和 Andrew Vande Moere。 。适应性建筑布局：如何通过共享半自主移动式机器人隔断的控制权，调和开放式办公室的环境需求与资源。载于*2024*年*CHI*计算系统中的人为因素会议论文集（美国夏威夷州檀香山）（*CHI '24*）。美国计算机协会，纽约州纽约，美国， 20 10 1145 3613904 3642465 页。https://doi.org/ 。/ 。Binh Vinh Duc Nguyen 和 Andrew Vande Moere。2024。适应性建筑研究挑战：赋能多住户建筑的居住者。https://doi.org/ 10 48550 2403 16600 2403 16600 [ ] 。/arXiv. 。arXiv: 。cs.RO Binh Vinh Duc Nguyen、Andrew Vande Moere 和 Henri Achten。2023。迈向以场所为媒介的机器人建筑：通过自主空间适应原型化有意义的人-建筑交互。鲁汶大学。[25] Yuki Onishi、Kazuki Takashima、Shoi Higashiyama、Kazuyuki Fujita 和 Yoshi- fumi Kitamura。2022。WaddleWalls：利用机器人隔断群构建的房间尺度交互式分隔系统。载于第*35*届美国计算机协会用户界面软件与技术年度研讨会论文集（美国俄勒冈州本德）（*UIST '22*）。美国计算机协会，纽约州纽约，美国，论文第29号，15页。https://doi.org/10.1145/3526113。3545615 Kas Oosterhuis 和 Nimish Biloria。2008。与主动式建筑空间的交互：Muscle 项目。美国计算机协会通讯51，6（2008年6月），70–78。https://doi.org/ 10 1145 1349026 1349041 。/ 。Thomas Parkinson、Stefano Schiavon、Jungsoo Kim 和 Giovanni Betti。2023。600座办公建筑中居住者对工作空间环境不满意的常见原因。建筑与城市4，1（2023），17–35。[28] Shruti Rao、Katja Rogers、Judith Good 和 Hamed Alavi。2025。设计“智能建筑”时，我们究竟在为谁设计？——建筑中人类体验设计研究的范围综述。载于*2025*年*CHI*计算系统中的人为因素会议论文集（*CHI '25*）。美国计算机协会，纽约州纽约，美国，论文第944号，23页。https://doi.org/ 10 1145 3706598 3713903 。/ 。David Sirkin、Brian Mok、Stephen Yang 和 Wendy Ju。2015。Mechanical Ottoman：机器人家具如何提供和撤回支持。载于第十届美国计算机协会/电气电子工程师学会人机交互国际会议论文集（美国俄勒冈州波特兰）（*HRI '15*）。美国计算机协会，纽约州纽约，美国，11–18。https: // doi.org/10.1145/2696454.2696461 Marco Spadafora、Victor Chahuneau、Nikolas Martelaro、David Sirkin 和 Wendy Ju。2016。交互式物件行为设计。载于 *TEI '16*：第十届国际有形、嵌入式与具身交互会议论文集（荷兰埃因霍温）（*TEI '16*）。美国计算机协会，纽约州纽约，美国，70–77。https://doi.org/ 10 1145 2839462 2839502 。/ 。Amir Tabadkani、Astrid Roetzel、Hong Xian Li 和 Aris Tsangrassoulis。2021。自适应立面的居住者中心控制策略综述。建筑自动化122（2021），103464。https://doi.org/10.1016/j.autcon.2020.103464 [32] Kazuki Takashima、Yusuke Asari、Hitomi Yokoyama、Ehud Sharlin 和 Yoshifumi Kitamura。2015。MovemenTable：移动式交互桌面的设计。载于人机交互——*INTERACT 2015*，Julio Abascal、Simone Barbosa、Mirko Fetter、Tom Gross、Philippe Palanque 和 Marco Winckler（编）。施普林格国际出版公司，瑞士沙夫豪森，296–314。https://doi.org/10.1007/ 978-3-319-22698-9 19 [33] Andrew Vande Moere、Sara Arko、Alena Safrova Drasilova、Tomáš Ondráček、Ilaria Pigliautile、Benedetta Pioppi、Anna Laura Pisello、Jakub Prochazka、Paula Acuna Roncancio、Davide Schaumann、Marcel Schweiker 和 Binh Vinh Duc Nguyen。2024。适应性工作场所：围绕个体居住者的福祉统筹建筑服务系统。https://doi.org/10. 48550 2403 16595 2403 16595 [ ] /arXiv. 。arXiv: 。cs.HC DS Vijayan、A Leema Rose、S Arvindan、J Revathy 和 C Amuthadevi。2020。智能建筑中的自动化系统：综述。环境智能与人性化计算期刊（2020），1–13。https://doi.org/10.1007/s12652-020- 02666-9 [35] Mikael Wiberg。2020。交互与建筑已死：建筑交互性万岁！*Interactions* 27，2（2020年2月），72–75。https://doi.org/10.1145/ 3378567 [36] Xinyan Yu、Marius Hoggenmüller、Xin Lu、Ozan Balcı、Martin Tomitsch、Andrew Vande Moere 和 Alex Binh Vinh Duc Nguyen。2026。将动态公共家具作为交互媒介：在真实环境中以机器人长椅吸引路人。载于*2026*年*CHI*计算系统中的人为因素会议论文集（西班牙巴塞罗那）（*CHI '26*）。美国计算机协会，纽约州纽约，美国，17页。https://doi.org/10.1145/3772318.3790640