

基于镶嵌图形二维展开的互动装置设计与建造

作者：丁褚桦¹，刘梦嫚¹，王晖¹ (通讯作者)

(1.浙江大学建筑工程学院，杭州，邮编：310058, wang_hui@zju.edu.cn)

摘要

结构稳定性与鲁棒性是限制可动建筑表皮发展的重要因素，目前可动建筑表皮设计大多采用单元式和分布式构造系统，故障率较高，鲁棒性难以保证。本文结合近期所作的互动装置设计与建造实例，探索以二维展开方式实现表皮稳定可动的方法。几何形态方面通过规则镶嵌图形加铰接点的方式实现二维方向上的稳定展开；运动机制方面采用单一动力源驱动四个面共 484 块面板；感应控制方面通过 Arduino 嵌入式平台，并配合感应器、灯光和音乐建立可展表皮反馈机制，提供了具身化的空间体验。在建造过程中发现并尝试解决离散单元的平面外变形、最大展开态和驱动机制、互动机制等实际问题。互动装置作为多学科交叉研究的平台，整合了建筑、几何、机械、自动控制等专业，构建了高效的驱动机制方案，提升了系统的稳定性和鲁棒性，拓展了可动建筑表皮的设计思路。

关键词：互动装置；镶嵌几何；二维展开；学科交叉研究

Keywords: Interactive Installation; Tessellation geometry; two-dimensional expansion; Interdisciplinary research

资助项目情况：浙江省自然科学基金项目（LY20E080019）；浙江省属基本科研业务费专项资金资助（2021XZZX016）

投稿编号#69

1. 引言

1.1 相关研究及实践

尽管被描述为可动建筑的例子可以追溯到许多世纪前，但可动建筑作为一个学术研究领域主要在早期的现代主义思潮中得到发展，出现了一系列结合机械装置的可动建筑案例。20 世纪 60 年代出现的建筑电讯派（Archigram）和新城代谢派都试图重新定义未来建筑的形式和特征，提出了很多可动建筑与可动城市的概念设想。之后出现了诸如 Utopie Group、Haus-Rucker Co.、Super Studio 和 Archizoom 等更为激进的先锋建筑团体。

William Zuk 和 Roger Clark 是第一批将可动建筑描述为“能够通过动态适应变化的建筑”

的学者之一，他们在 1970 年出版的《可动建筑》(Kinetic Architecture) 一书中描述了可动建筑。即“建筑应是在一定压力下建立的一个平衡反应的形式，而不应是一直稳定的状态”^[1]。其对可动建筑的定义包含了建筑或其构件机动性、可变性、组装性、智能性的特征。实验探索也逐步深入，如西班牙建筑师 Emilio Perez Piñero 在研究中发现将直线剪叉机构的转动中心从中心点向边缘移动，即可利用该机构构造出曲线结构。Piñero 通过曲线机构的组合构造了可展壳体结构^[2] (图 1)，并提出了包括旅行亭，可伸缩穹顶和临时围场等许多结构系统。

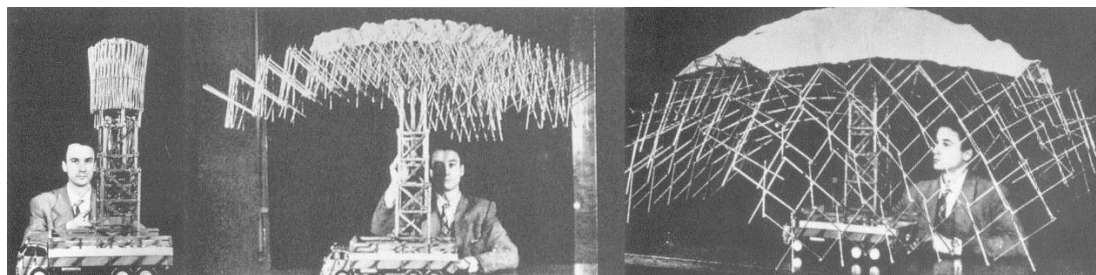


图 1 Pinero 研制的可展壳体结构 (图片来源: 参考文献[2])

目前国内外关于可动建筑的研究，集中在可调适建筑表皮、动态建筑结构、互动艺术装置以及智能建筑材料等方面。哈佛大学 Chuck Hoberman 团队在直线剪叉杆组的基础上，通过将直杆变为具有夹角的折弯杆构造了折弯剪叉杆组，通过将组合的折弯杆组插入到基础多面体的边，并将顶点铰接构造 Hoberman Sphere 可展机构^[3-5]，启发了后期大量可展杆状结构研究。可动表皮是可动建筑研究的主要领域，麻省理工大学媒体实验中心 (MITMedia Lab)、英国伦敦建筑联盟学院 (AA School)、德国斯图加特大学 ICD 研究所等学术机构分别从互动装置、信息技术应用和智能材料研究等不同的角度走在了适应性动态建筑表皮研究发展的前沿 (图 2)，国内哈尔滨工业大学团队在结合环境性能的可动建筑表皮方面进行了深入的探索^[6]。

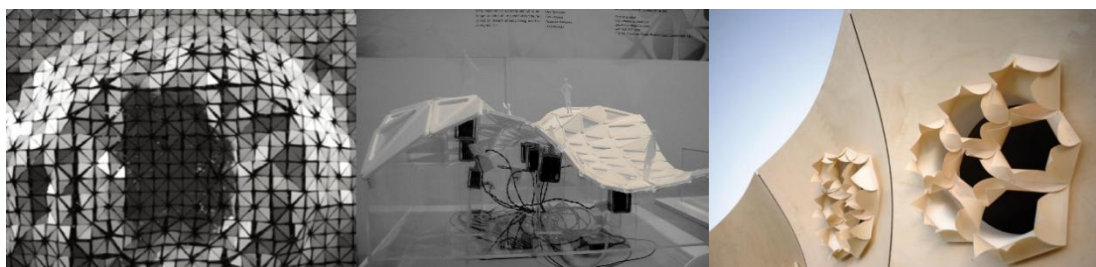


图 2 MIT、AA School 和 ICD 在可动建筑方面的尝试

(图片来源: [https://www.media.mit.edu/research/?filter=groups](https://www.media.mit.edu/research/?filter=groups;);
<https://www.aaschool.ac.uk/academicprogrammes>; <https://www.icd.uni-stuttgart.de/projects/>)

1.2 应用潜力与限制因素

可动建筑尤其是可动表皮具有醒目的艺术表现力，随着信息化、智能化技术的发展，为现有的建筑造型、立面和空间体验注入新的活力。更重要的是，可动建筑表皮在温控、光控、声控等方面有突出的潜力，在环境响应方面具有优势，能更好地结合室内外环境需求对空间进行调节，在低碳建筑等领域有良好的发展前景。

另一方面，目前可动建筑表皮在技术水平、经济成本方面仍有许多限制因素。例如在能耗上，部分案例存在先耗能再节能、为可动而可动的问题；在构造上目前大多数案例采用表皮单元旋转、折叠方式，驱动方面采用多单元分布式驱动系统，结构稳定性和鲁棒性较低。这些问题最终都体现在成本方面，可动建筑表皮普遍存在一次性投入成本大，运营（能耗、维护）成

本高，并且由于表皮所占据的空间厚度，也造成建筑面积的浪费。

20 世纪 80 年代建成的巴黎阿拉伯世界文化中心是可动建筑表皮的经典案例。它借鉴了相机快门的构造，遮阳金属表皮被划分为不同尺度的矩形单元，单元中间的可收缩圆孔通过扇形面片旋转控制，属于二维可动表皮，但构造层次复杂，故障率高。2012 年建成的迪拜巴哈塔（Al Bahar Towers）是三维折叠表皮的应用案例，其可动表皮运用了折纸（Origami）原理，通过均匀排布的正三角形单元实现，但结构厚度较大。两个案例的可动表皮都有良好的艺术表现力和环境响应能力，但都存在构造复杂、运转能耗高、造价昂贵的问题^[7]（图 3）。

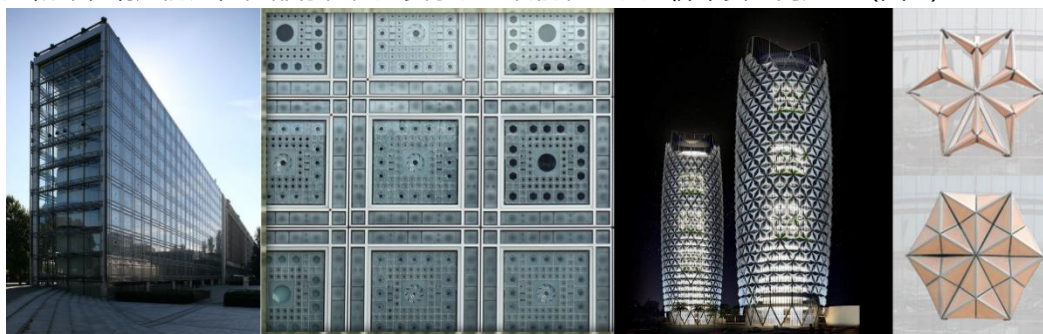


图 3 阿拉伯世界文化中心（左图）和巴哈塔（右图）整体表皮和表皮单元
（图片来源：<http://www.iarch.cn/thread-31877-1-1.html>；<https://www.archdaily.com/270592/al-bahar-towers-responsive-facade-aedas>）

2. 二维可展表皮的探索

2.1 互动装置

课题组近期设计制作的互动装置作品 Discrete Metaverse 是个层层嵌套的立方体结构（图 4）。外框立方体边长 4.8 米，内框立方体 2.4 米，采用了可动金属表皮，闭合后形成立方八面体，观众可以进入其内部进行体验。立方八面体的内表面为镜面，其几何中心是边长 0.1 米和 0.3 米嵌套的发光体。这个装置综合运用了机械装置、感应装置、音乐、灯光等手段，以具身化的方式探讨了当代语境下虚拟空间与现实空间、中心化与去中心化（离散化）的复杂关系（图 5）。

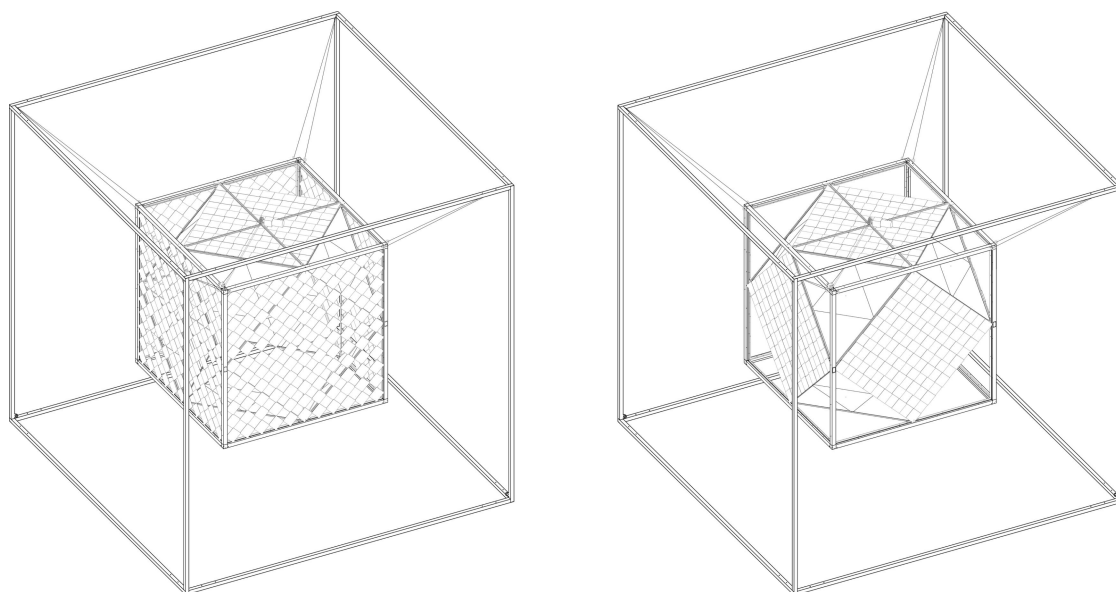


图 4 Discrete Metaverse 设计图（图片来源：作者自绘）

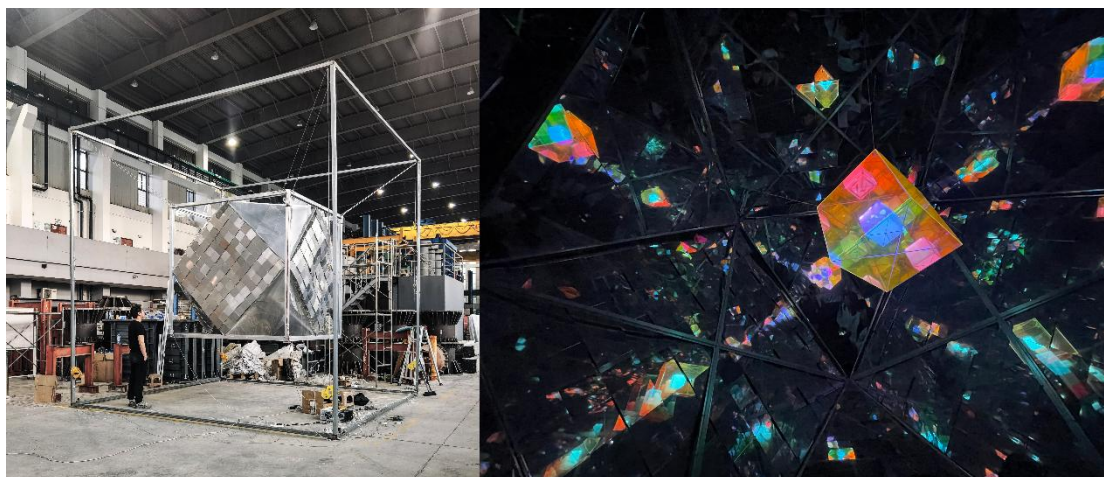


图5 互动装置外部实景与内部效果（图片来源：作者拍摄）

2.2 基于二维镶嵌加铰接点的可动表皮

立方八面体的表皮采用了二维展开的可动表皮，在几何形态方面基于镶嵌几何原理，通过规则镶嵌图形加铰接点的方式实现表皮的展开。几何学上的镶嵌（Tessellation）是指用无缝隙且无重叠地铺满平面或者空间的状态。根据镶嵌单元的重复性，可以分为周期、准周期、非周期等类型。在二维平面镶嵌中，由正多边形组合构成的均匀镶嵌（Uniform Tessellation）应用最为广泛，其中最常见的是单一正多边形构成的镶嵌。此装置的可动表皮通过对这种镶嵌添加铰接点的方式，实现旋转展开（图6）。从机械学角度，这个系统属于单自由度系统（single DoF system），可动单元都具有确定的运动轨迹，仅用一个参数即可确定机构的运动状态^[8]。

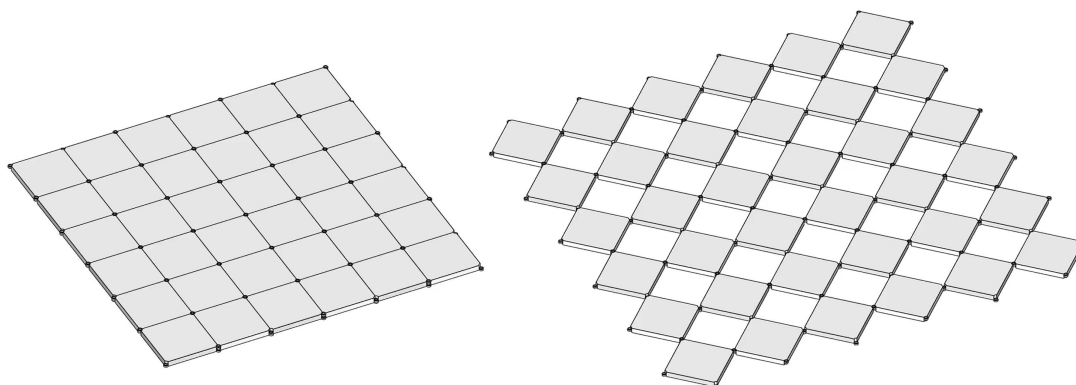


图6 正方形添加铰接点的展开方式（图片来源：作者自绘）

2.3 铰接点构造设计

从几何形态到实际物理状态是具有挑战性的跨越。节点构造的体积大小、厚度、牢固性等因素影响实践中整体机构的运动机制和美观。可动平面单元的铰接点可以分为面内节点和面外节点两种类型。面内节点是指节点在基本几何单元范围内，单元之间有一定的重叠，通过铆钉等直接铰接；面外节点是节点放大、超出基本几何单元范围，一般通过单元之间的凸凹设计实现。面内节点的构造较为简单，力学性能好，缺点是由于节点的占位问题，往往无法达到理论上的最大展开态。面外节点在实现最大展开态上具有优势，但构造较为复杂，节点本身一般需要一定的厚度来实现铰接的稳定性，在多个单元相互铰接的情况下其厚度可能达到不合理的程

度。

经过分析，该装置的可动表皮采用了面内铰接点。所有单元在几何图形基础上扩展一周并分为四层（图 7），两两分层铰接（一层与二层、二层与三层、三层与四层、四层与一层）。具有体积的节点在机构闭合状态下位置几何位置冲突，为避免节点相撞和构造厚度过大，将所有铰接点以面片几何中心为圆心旋转一定角度，使在机构闭合时所有节点位置相互错开，机构的厚度仅为四层图形单元面片叠加的厚度。但是面内节点会造成展开角度的损失，导致机构无法展开至理论最大，更完善的节点设计有待进一步研究（图 8）。实际操作中，为追求美观与构造间的平衡，节点要求强度高且体积小，所以采用 M3 高强度对锁螺丝将面片分层铰接。

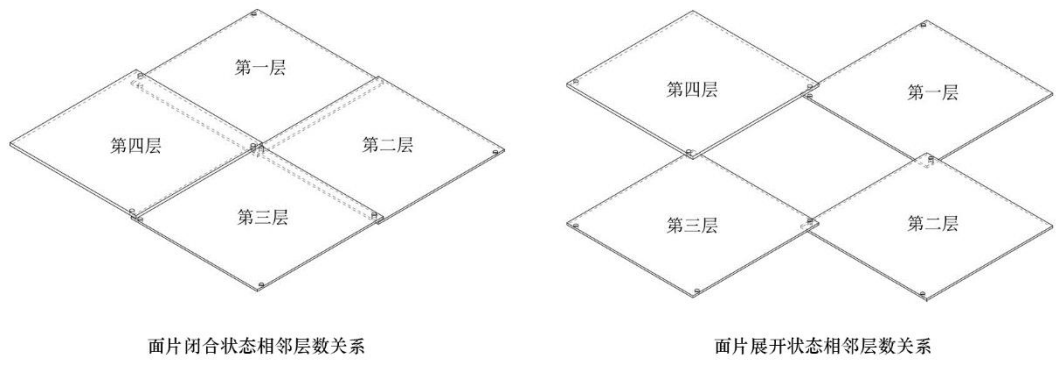


图 7 面片铰接关系（图片来源：作者自绘）

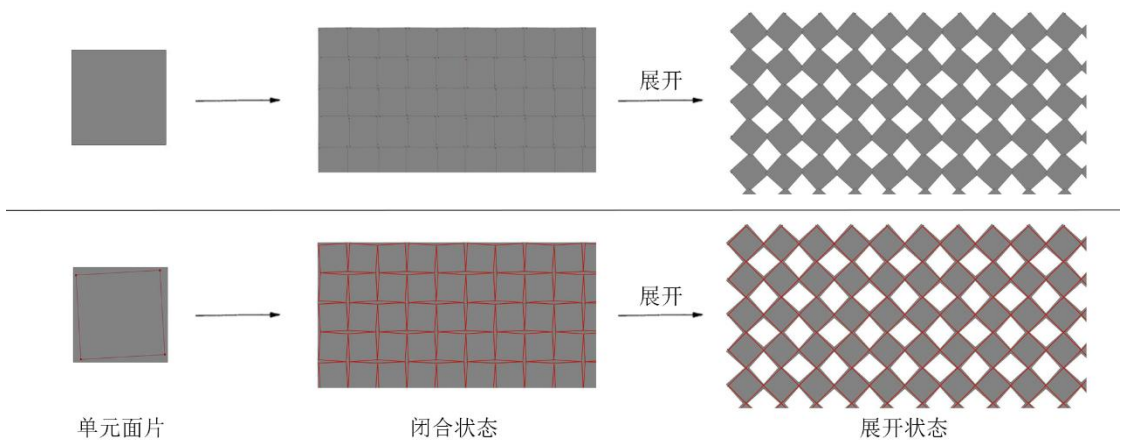


图 8 铰接点错开以及最大展开损失角度（图片来源：作者自绘）

2.4 机构运动过程中的面外变形问题

由离散单元构成的二维镶嵌图形整体性较弱，结构强度低，受到重力影响在竖直状态下单元容易产生平面外形变，立面产生前后凹凸，这种情况在表皮闭合的过程中发生的几率高于展开过程。另外，数控加工的构件与购买的标准化零件均存在标准误差，累计误差的存在导致大尺度构件的安装很难保证误差在毫米级以下，这些误差会进一步加剧面外变形问题。变形程度较大时会导致单元间相互卡锁，影响整体机构运动甚至导致机构损坏。该装置的每个侧面由纵横各 11 块铝合金板组成，根据二维展开具有中心性的特点，采用了十字框在立面中心增加一个固定点（图 9），以中心点作为受力支点，将悬空单元整体长度减少到 1/4。进一步在内侧安装一层透明亚克力，防止机构向内形变后与内部固定结构冲突。

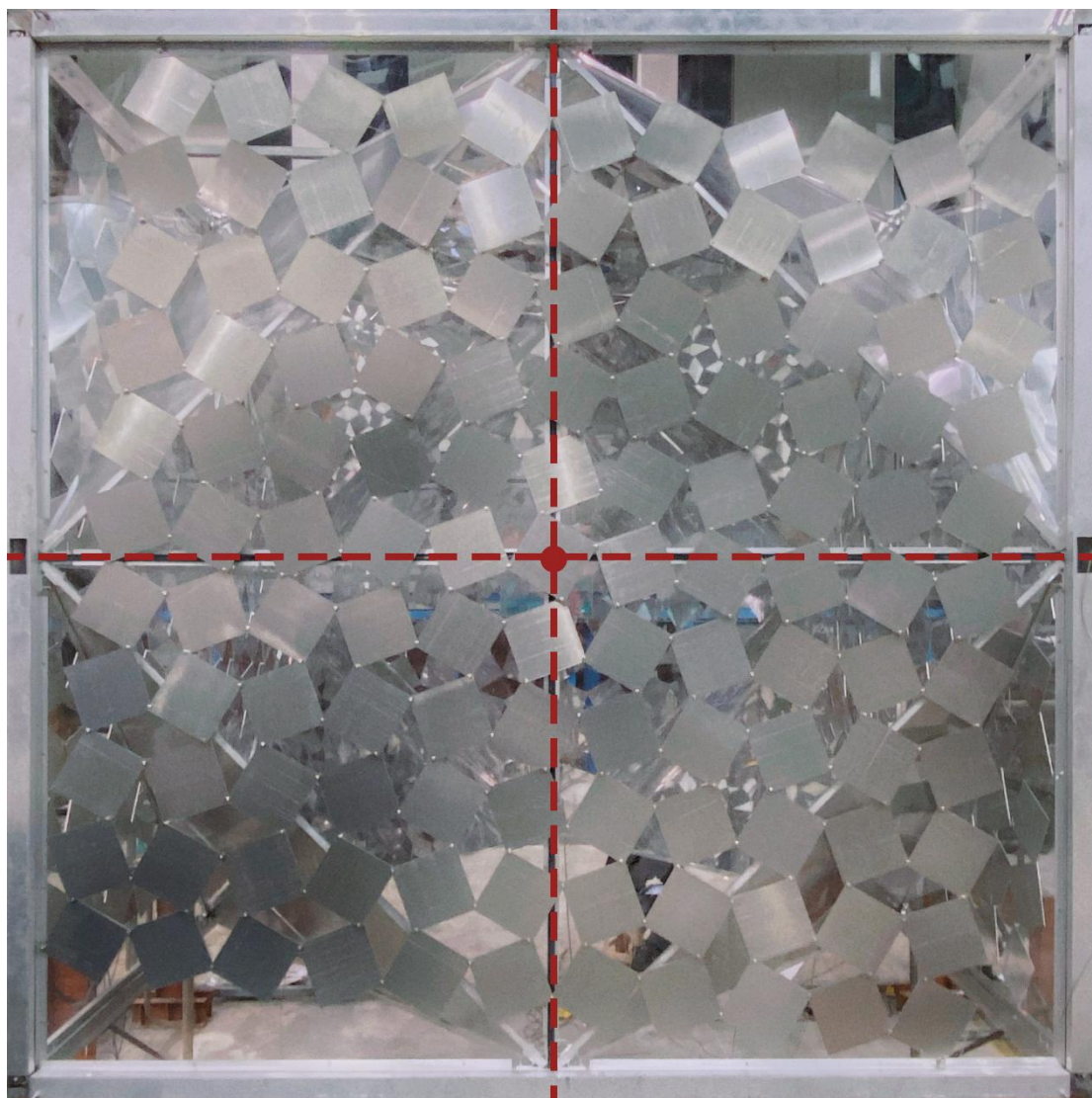


图9 表皮旋转的中心点固定（图片来源：作者自绘）

3. 可展表皮的驱动系统

3.1 立面的单轴驱动机制

不同于传统的分布式驱动，该装置探索了单轴驱动的机械运动方式。它是利用驱动点的线性运动来驱动整体结构，能够通过简单构件的局部运动实现系统的整体运动，具有动力机制简单、系统鲁棒性强等优势。在单轴驱动机制中，不动点、驱动点和滑移轴为其主要构成要素。每个立面以几何中心为不动点，以某一边上的单元角点为驱动点沿外框滑移，实现121个正方形面板的旋转展开。作为驱动点的滑块被限定在导轨上，导轨隐藏在边框中（图10）。进一步，同一立面上的四个滑块通过一条钢丝和8个转角滑轮被连接成一个封闭的“驱动环”，使立面单元在中心对称的受力状态下更加稳定^[9]。

3.2 整体的单一动力源驱动

为实现“以少博多”的高能效方式，互动装置采用单一动力源，由一个小型电机驱动装置中心立方体的四个面，共484块离散单元。电机键轴通过法兰盘与绕线盘连接固定，驱动钢索与“驱动面”上部的滑块连接；另一驱动钢索与“驱动面”竖向一侧滑块连接，并通过转角滑轮穿过绕线盘另一固定孔洞固定，两驱动钢索形成一个封闭的“动力环”。相邻的“驱动环”共

用一个滑块，因此相邻面的旋转方向相反，四个面构成四个相互关联的“驱动环”（图 11）。四个立面表皮的展开与闭合，通过电机键轴的顺、逆时针的旋转方向进行控制。

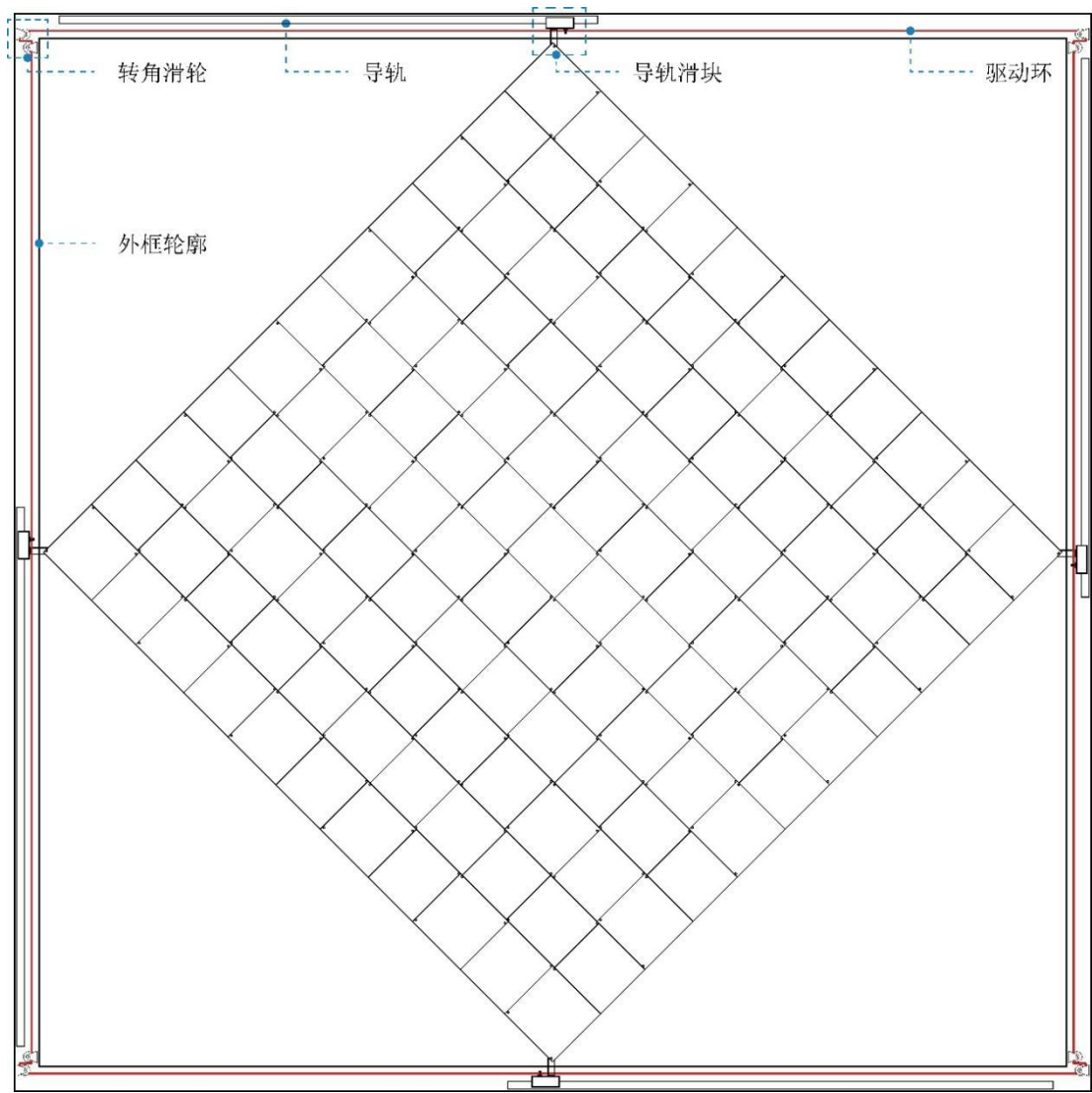


图 10 单个驱动环结构（图片来源：作者自绘）

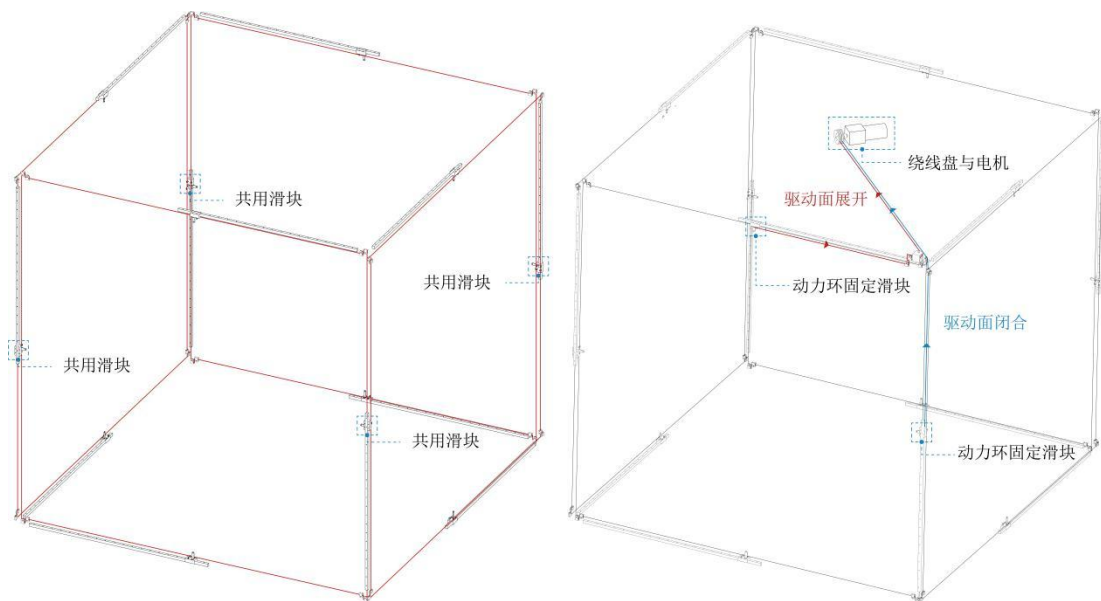


图 11 四个环结构（左图）及驱动索分布（右图）（图片来源：作者自绘）

4. 可展表皮的互动响应

4.1 基于互动机制的具身化体验

课题组与自动控制专业团队进行跨学科合作，实现了人与装置的互动。当有人进入外框范围时，感应器感应到人并触发运动机制，背景音乐响起，内部灯光亮起，立方体表皮徐徐展开。观众进入立方体后，立方体表皮闭合，内部灯光随背景音乐逐渐黯淡或逐渐亮起，内部镜面互相反射，灯光的镜像和自我的镜像在无限空间中不断延伸，并随时间发生变化，给体验者以真实与虚拟相互交融的感受（图 12）。

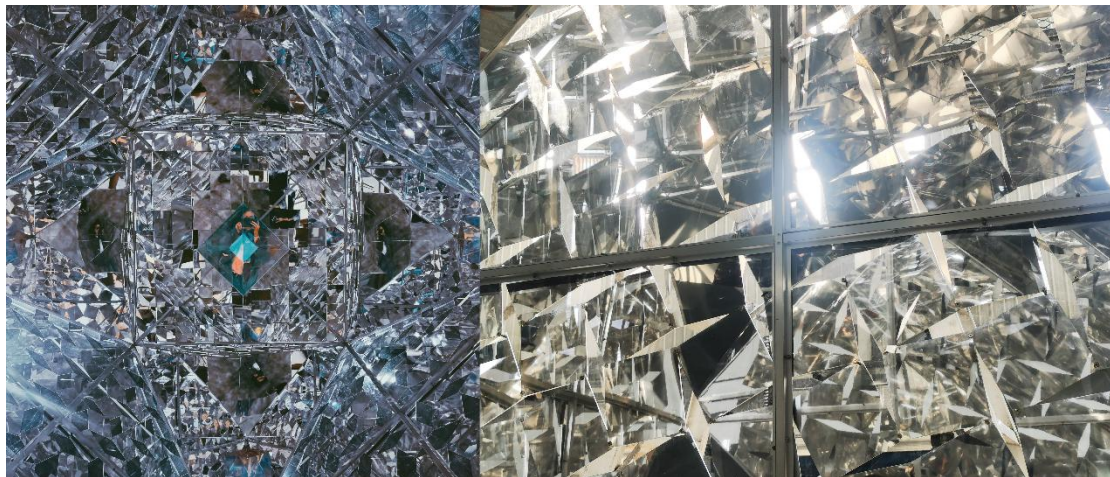


图 12 内部镜像空间的无限深度效果（图片来源：作者拍摄）

4.2 响应电路构造

响应电路由感应器、arduino 电路板、驱动器、LED 装置灯、音乐播放器和电机构成。感应器采用 8 个主动式漫反射红外线传感器，安装于外框底部的框架之上，每个感应距离约 4m，感应范围是 30-40°圆锥角。驱动器使用的是智能电机驱动模块，具有较好的驱动和刹车效果。电机选用的是 24V 永磁直流减速电机，能够在驱动钢索的过程中克服摩擦和面片自重。装置灯的明暗变化则是通过驱动器控制 LED 两端的电压实现。

5V 的直流电源为感应器单独供电，24V 的直流电源为 arduino 电路板、驱动器、LED 装置灯和电机供电。响应电路的整体反馈机制为：红外线传感器感应体验者并传送感应信号，arduino 接收感应信号并将信号分别传送给驱动器、LED 装置灯、音乐播放器，进而驱动器向驱动电机输送信号，最终实现对装置驱动面的展开与闭合、LED 装置灯的明与灭、音乐播放器的播放与关闭的整体控制。

结语

作为受邀参加 2022 中国设计大展及公共艺术专题展的艺术作品，互动装置在制作过程中形成了一个多学科交叉研究的平台，跨越了建筑、几何、机械、自动控制等多个专业，特别是自动控制团队提供了有力的技术支持。建筑专业在其中起到了统筹领导的核心作用，凸显了建筑教育所具有的整体性思维和全局把控能力。装置作品的设计与建造前后历时半年，团队成员付出了艰苦的努力，也有多方面的收获。从可动表皮本身而言，它构建了新的可动表皮形态与驱动机制方案，提升了系统的稳定性和鲁棒性，拓展了可动建筑表皮的设计思路。不仅如此，大尺度复杂装置的制作推动了跨学科研究与合作，整合了艺术思维、工程思维、管理思维乃至经济思维的训练过程，对面向未来的建筑教育也具有一定的参考意义。

参考文献

- [1]William Zuk, Roger H.Clark. Kinetic Architecture[M]. New York: Van Nostrand Reinhold, 1970
- [2]Pinero E P. Project for a mobile theatre[J].Architectural Design, 1961, 12(1):154-155
- [3]Hoberman C. Reversibly expandable doubly-curved truss structure[P].U.S. Patent 4,942,700.1990-7-24
- [4]Hoberman C. Radial expansion/retraction truss structure[P].U.S. Patent 5,024,031.1991-6-18
- [5]Hoberman C. Reversibly expandable structures having polygon links[P].U.S. Patent 6,082,056.2000-7-4
- [6]朱鹏程. 互动建筑研究初探[D]. 东南大学, 2017.
- [7]巴黎阿拉伯文化研究中心[J]. 照明设计, 2006(4):96.
- [8]孙桓. 机械原理[M]. 北京:高等教育出版社, 2006.
- [9]丁褚桦, 叶子超, 王晖. 基于极坐标系的单轴驱动可展建筑表皮形态控制研究[A]. 智筑未来—2021 年全国建筑院系数字技术教学与研究研讨会论文集[C]. 武汉, 2021: 313-320
- [10]Joseph D. Clinton. Advanced structural geometry studies. Part 2: A geometric transformation concept for expanding rigid structures[M].Washington: National Aeronautics and Space Administration, 1971
- [11] PATEL J, ANANTHASURESH G K. A kinematic theory for radially foldable planar linkages[J].International Journal of Solids & Structures,2007,44(18): 6279-6298.
- [12]YOU Z, PELLEGRINO S. Foldable bar structures[J].International Journal of Solids & Structures, 1997, 34(15): 1825-1847.

图表来源

图1：参考文献[2]

图2：<https://www.media.mit.edu/research/?filter=groups><https://www.aaschool.ac.uk/academicprogrammes>;

<https://www.icd.uni-stuttgart.de/projects/>

图3：<http://www.iarch.cn/thread-31877-1-1.html>; <https://www.archdaily.com/270592/al-bahar-towers-responsive-facade-aedas>

图4、图6、图7、图8、图9、图10、图11：作者自绘

图5、图12：作者拍摄