

基于 MR 工具的线性捆束空间结构与建造方法研究

李锦同¹, 陈洁诗¹, 张天宇¹, 闫超², 袁峰³, 刘函宁⁴

摘要:

混合现实 (MR) 技术在智能设计建造领域的应用日益广泛, 尤其在弯折结构形式方面, 通过虚拟现实的可视化与辅助空间定位, 可以实现了复杂空间结构的加工与装配。然而, 手动弯折的构件常面临受力性能限制, 难以在大尺度空间建造中有效应用。为解决这一问题, 本研究提出了一种将小截面、可弯折构件进行捆束绑扎的设计建造方法。通过实际案例, 研究其设计过程中的几何问题, 并运用 MR 技术进行辅助弯折、捆束的建造实验, 从而验证该方法在面对复杂空间结构设计问题时的有效性, 论证其在大尺度空间弯折建造方面的推广和应用潜力。

关键词: 混合现实; 捆束结构; 弯折几何; HoloLens

Keywords: Mixed Reality; Bundled Structure; Bending Geometry; HoloLens

1 引言

随着人工智能模型的迅猛发展, 建筑领域正经历着显著的进步。由于混合现实 (Mixed Reality-MR) 技术的引入, 建筑师们的设计焦点逐渐从传统的屏幕空间中的三维设计转向结合 MR 全息技术的设计方法, 这种方法能够依据现实环境进行一比一的实时可视化模拟, 从而为复杂空间形式的设计与建造提供了更多可能性^[1]。数字化设计使得复杂几何形态的设计成为可能, 并且设计的多次修改也更加便捷。然而, 数字化设计的局限性在于其复杂的空间属性, 使得设计与建造的一体化难以实现, 从而导致复杂空间设计难以付诸实施。近年来, MR 辅助建造技术的出现有效弥补了这一短板, 使设计建造一体化的实现成为可能。

通过 MR 设备, 全息数字设计与物理空间实现了有机结合。这种交互式工作流程赋予用户更大的设计自主权, 并显著提升了整体精度和效率。目前, 许多研究团队正致力于探索 MR 在设计建造中的应用潜力, 这些研究涵盖了从传统工艺到现代材料的广泛空间探索。例如, 研究领域包括传统的砖砌工艺^[2], 木枝搭建^[3], 铝板编织装置^[4], 以及竹编结构^[5]。由此可见, 借助 MR 技术的辅助, 设计师能够实现不同材料如木条、铝板、竹子的复杂线性空间结构的构建。

¹ 李锦同, 陈洁诗, 张天宇, 同济大学建筑与城市规划学院, 本科生

² 闫超, 同济大学建筑与城市规划学院, 助理教授

³ 袁峰 (✉), 同济大学建筑与城市规划学院, 教授, philipyuan007@tongji.edu.cn

⁴ 刘函宁, 同济大学建筑与城市规划学院, 硕士研究生

借助 HoloLens，设计师能够精确地依据投射到物理空间中的虚拟全息图进行对齐操作，并实施手工弯折（图 1）。这种交互式工作流程为设计与建造的一体化提供了可能性。然而，当可手工弯折的线性空间结构从小尺度扩展至大尺度设计时，设计师需要同时考虑三维弯折线性结构之间的连接问题，以及材料的结构承重和支撑等关键因素。

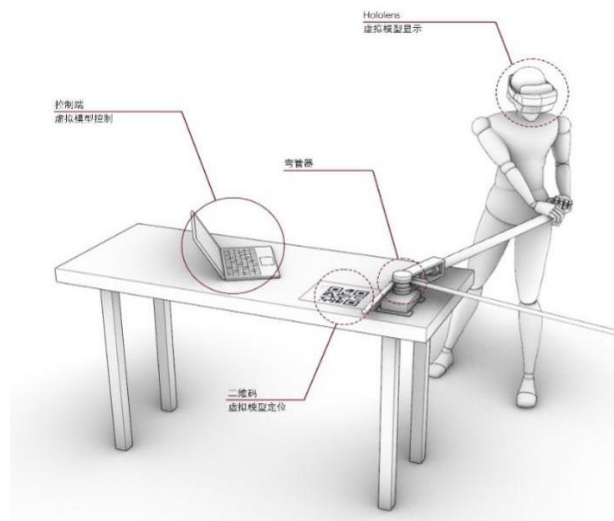


图 1 MR 辅助手工可弯折钢管（图片来源：作者自绘）

在面临上述问题时，捆束构造是一种常用且有效的建造方式。目前已有多种捆束方法在实际应用中得到验证。例如，“编织钢亭”^[6]采用两根钢管进行捆束，最终形成完整的钢亭结构；“无节点网络”^[7]则对多根管道的捆束结构进行了探索，这些研究均在 MR 辅助技术的支持下，对捆束结构的可行性进行了深入探讨。

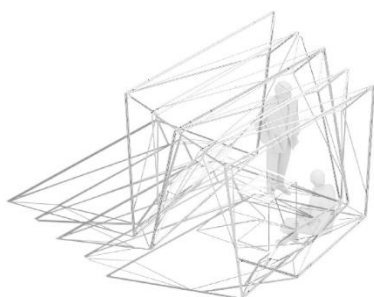


图 2 建造渲染轴测图（图片来源：作者自绘）



图 3 建造实景图（图片来源：作者自摄）

捆束构造为复杂的线性空间结构设计以及 MR 辅助建造带来了新的挑战，这些挑战包括设计过程中的复杂性以及 MR 辅助装配时的难度。然而，这些问题在现有的研究中尚未得到充分讨论。基于此，本研究以此为主题进行了探究，并通过实地建造案例进行了实证。（图 2，3）

2 几何研究

2.1 基本的捆束构造原型-截面-几何限制

本文首先研究了捆束构造中钢管在弯折操作时面临的几何限制。以双管截面模型为例，可以发现钢管的可弯折范围在其与相邻钢管的切线夹角范围内，如图 4 左所示，1 号钢管的可弯折范围为与 2 号钢管的切线形成的夹角。图 4 中虚线所示即为 1 号钢管在可弯折范围内弯折后的钢管位置，此时 1 号钢管不与 2 号钢管碰撞；若 1 号钢管超过切线范围内

弯折，如图 4 右虚线所示，则弯折后钢管位置与 2 号钢管有重叠，现实中会因为体积碰撞而无法实现弯折，此即单管弯折的几何限制。

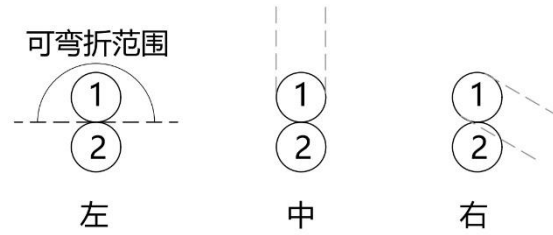


图 4 2 根钢管的几何限制（图片来源：作者自绘）

进一步拓展至三管模型，每根钢管的可弯折范围同样为该钢管与相邻钢管的切线夹角范围。如图 5 所示，1 号钢管的弯折受到 2、3 号钢管限制，所以可弯折范围为切线 2（1、3 号钢管的切线）与切线 3（1、2 号钢管的切线）组成的夹角范围。若将 1、2 号钢管同时同向弯折，由于 1、2 号管作为一个整体，相互之间的几何限制不复存在（弯折前后截面均保持相切），但与 3 号管的几何限制仍存在，所以弯折范围为切线 1（2、3 号钢管的切线）与切线 2（1、3 号钢管的切线）组成的夹角范围。

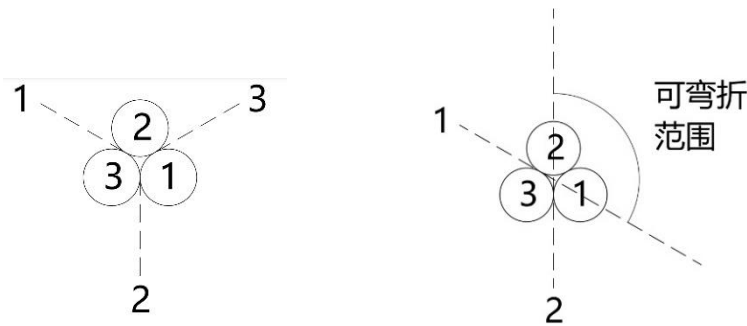


图 5 3 根钢管的几何限制（图片来源：作者自绘）

将钢管数量增加到建造装置所需的 7 根时，如图 6 所示，可以发现几何限制没有改变——单根钢管的可弯折范围仍为该钢管与相邻钢管的切线范围，双钢管同时同向弯折的可弯折范围也是与相邻钢管的切线范围。



图 6 7 根钢管的几何限制（图片来源：作者自绘）

当两捆等量钢管相互连接时，相连后的两捆钢管相当于同步弯折的一捆钢管，因此可以认为两捆钢管截面之间存在对称面，钢管根据对称面一一相连，几何原型可简化为图 7 所示的 3 种情况。在此情境下，每根钢管仍需遵循前述的几何约束，且连接顺序受到这些约束的严格调控。如图 8 左所示，对称轴两侧的 1 号钢管相连时，钢管弯折角度在可弯折范围内，此时弯折成立；图 8 右所示，若直接将 2 号钢管相连，由于 1 号钢管的几何限制，2 号钢管会与 1 号钢管碰撞，弯折不成立，须 1 号钢管相连后 2 号钢管才可相连。由此我们可以发现两捆钢管相连的一些条件：

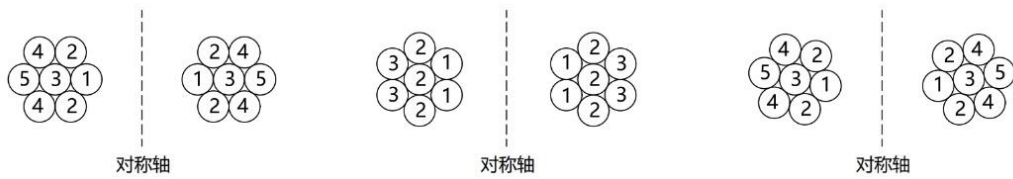


图7 钢管相连的3种几何原型（图片来源：作者自绘）

- 根据对称面对称的两根钢管才可相连。
- 根据钢管截面中心点到对称面的距离及位置关系，可将钢管分为1-5级不等，相连时需要按照钢管等级次序相连，1级钢管全部相连后2级钢管才可相连。

不难发现，同级钢管间不存在等级次序，相连不受前后次序影响。

若非直接相连，则如图9所示，两根钢管在各自可弯折范围内进行弯折相连也可成立，多根同向相连同理，满足各自的几何限制即可。

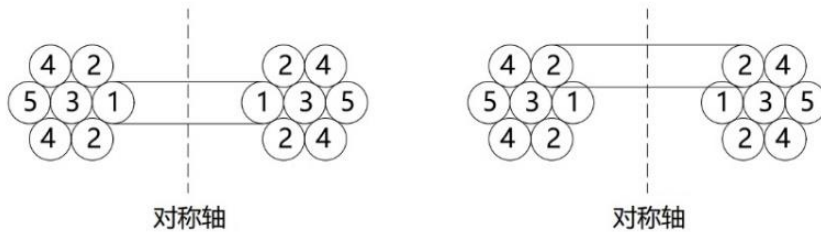


图8 钢管直接相连示意图（图片来源：作者自绘）

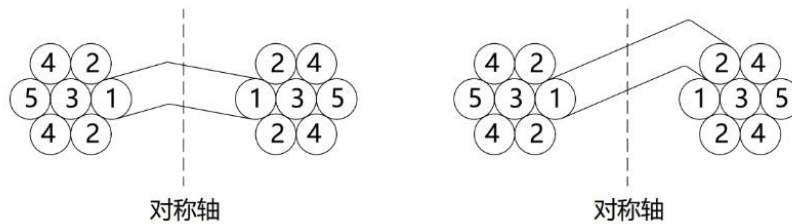


图9 钢管非直接相连示意图（图片来源：作者自绘）

2.2 基于几何限制的多目标整体形态优化-找形

在前述研究中，我们已经确定了成捆钢管弯折的几何限制。为了进一步设计整体形态原型，必须基于这些几何限制对设计内容进行合理调整。

在构造层面，整个装置的框架主结构由五根钢管捆扎而成，其走向决定了装置的整体框架形态。在确定最终形态时，必须将所有几何限制纳入考虑。因此，整体形态设计的工作流程如下：首先，从设计角度明确整体形态的设计逻辑并生成设计原型；其次，指定设计原型中的可变参数，例如结构中轴线上某些线段的具体位置和角度关系；最后，借助参数化建模工具，在设计原型的电子模型中添加几何限制，并通过反复调整优化，最终迭代生成符合几何限制的整体形态。

在主结构设计上，该装置采用了螺旋三环式的基本形态，中轴线为一根连续的折线，这一设计不仅使结构简洁明了，还限定了充足的内部空间。地面上的四根线段相互平行，位于装置的两侧，承担支撑整个装置的功能；顶面上的三根线段相互平行，承担维护顶面的功能；其余方向的线段将它们连接在一起，形成连续的整体。

针对该设计原型，指定若干可变参数，为调整形态提供空间。这些可变参数包括：地面线段的位置、角度、相互之间的距离；顶面线段的角度；以及起始点的位置。通过使用 Rhino 和 Grasshopper 进行参数化建模，最终呈现的效果如下：五个数字滑杆分别控制五个具体参数，实现装置整体形态的实时调整。

在电子建模过程中，对于由五根钢管捆扎而成的结构，存在如下限制：中轴线拐角处的两个折线段上的钢管需满足对称排布，即每两根对应的钢管的轴线必须在同一平面，否则相应的钢管之间无法连接。中轴线起始点处的 T 字形节点要求分叉出的折线段与贯穿的折线段上的钢管也需满足对称排布。为了量化这一限制，我们用一个变量，即角度特征值，概括中轴线折线段上五根钢管的排布位置。角度特征值表示五根钢管围绕中轴线旋转的角度大小。中轴线的每一折线段都可以基于其对应的角度特征值，建立起五根钢管的唯一模型。根据设计原型，从中轴线的起始折线段开始设定一个初始的角度特征值，利用对称排布的原则推演出下一折线段的唯一角度特征值。通过反复推演，最终得出所有折线段的角度特征值。在此基础上，仅需确保两个 T 字形节点处的折线段满足对称排布即可。具体方法是通过两种途径分别求出同一折线段的角度特征值，若两个角度特征值相等，则满足要求。

利用遗传算法，将五个可变参数置入基因池，并将两个角度特征值的差值与零的接近程度作为适应度标准。若差值趋近于零，则适应度最高，满足整体形态的几何限制。算法以随机参数为初始值，不断优化，最终求得适应度最高时的参数值，从而获得符合条件的最终形态。由于参数的自由度较大，遗传算法所得解并非唯一，多次求解后可得不同的最终形态。最终根据美观度和空间利用率选择最优方案进行进一步深化设计。

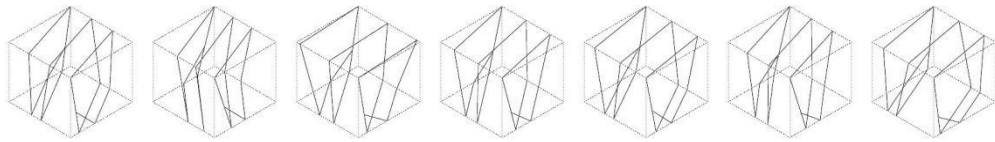


图 10 遗传算法求得多个解（图片来源：作者自绘）

在框架主结构中轴线的基础上，进一步分支出多条支线，形成地面座椅的框架，并在顶面与侧面形成交错的界面，进一步限定空间。在设计层面，支线顶点与框架主结构的相对位置采用统一模数，形成规整有序的形态。最终，以简洁的轴线形式连接各个点，构建完整的轴线模型。

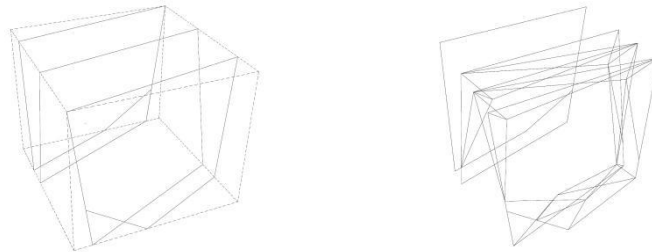


图 11 框架主结构和支线结构（图片来源：作者自绘）

2.3 捆束构造形态深化

轴线模型只能确定装置的总体形态，而不能精确定位每根钢管的具体位置。因此，需要进一步研究捆束构造，将每条轴线转换为一到五根不等的钢管捆束，以确保结构的稳定性。在主结构

中，需采用五根钢管捆扎，形成稳定框架；对于分支出的支线，则视具体情况选择一至四根钢管捆扎，以便在减轻重量的同时实现有效固定。

基于轴线模型，我们提取了各个节点的几何特性，并设想了每个节点的多种情况，归纳总结出以下捆束构造的节点原型。根据节点上轴线的重要程度，可将其分为主结构节点、次结构节点和主-次结构节点。主结构与主结构相连接的节点仅为一种，即 T 字型节点；次结构与次结构相连的节点，根据连接数量不同可分为四根交汇型和五根交汇型；而主结构与次结构相连的节点则更为复杂，首先可根据次结构连接到主结构的位置分为中点型和角点型，然后根据连接次结构的数量进一步分为单根分叉型、两根分叉型和三根分叉型。由此，可分类得到九种节点原型。

接下来，对每种节点原型的轴线所对应的钢管捆扎数量进行分类讨论。主结构节点固定为五根钢管捆扎，次结构节点为一到两根钢管捆扎，由此得出十八种细分节点原型。在实际设计中，情况可能更加复杂，因此还需根据具体情况进一步调整钢管捆扎的数量。

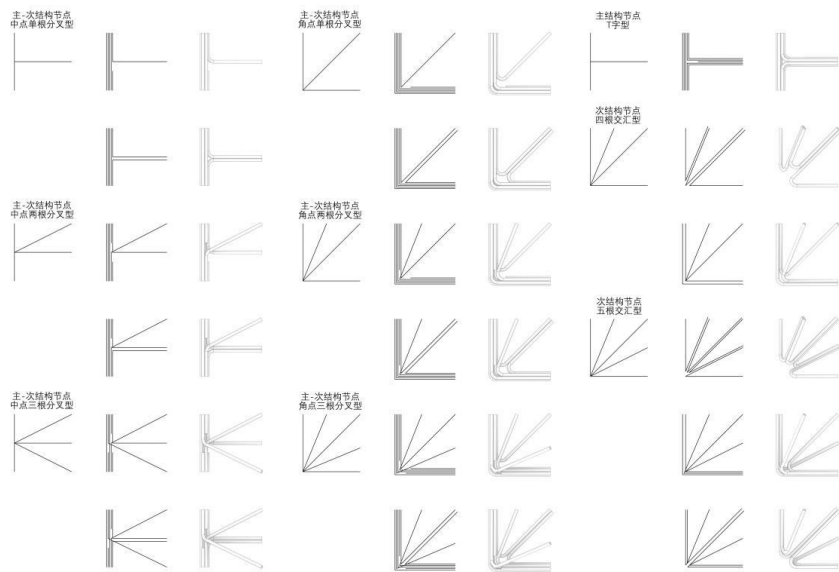


图 12 节点原型图解（图片来源：作者自绘）

在节点原型的基础上，根据轴线模型的实际情况进行深化，建模每一根钢管的中心线，形成钢管中心线模型。在构造层面，由于需要考虑钢管材料的最大长度限制，所有单根钢管的弯折程度被设计为两到三段，即每根钢管需要进行一到两次的弯折。主结构的钢管必须设置多个断开点，且五根钢管的断开点需要相隔一定距离排布，以增强捆束后的牢固性。支线钢管需从主结构的五根钢管分支，因此支线钢管的一段弯折段需与主结构捆束在一起。而在次结构与次结构连接的部分，两根支线钢管的弯折段需分别捆扎在一起。

建立钢管中心线模型的原则如下：当二到五根钢管捆扎时，每两根钢管中心线之间的距离应为所选钢管的直径；三根以上钢管捆扎时，确保所有钢管的圆形截面两两相切，形成最紧密的排布。此外，在弯曲钢管中心线的建模过程中，还需实时检测生成的钢管实体是否发生碰撞，以保证模型的精确性。最终，在钢管中心线模型的基础上，根据钢管材料的直径和弯曲半径，建立钢管实体模型。

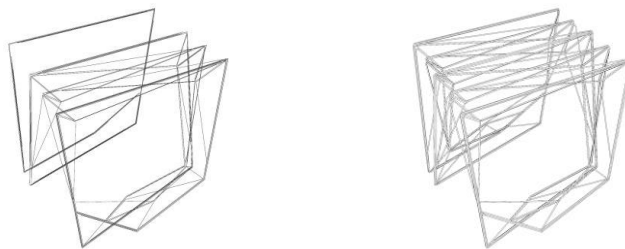


图 13 钢管中心线模型和钢管实体模型（图片来源：作者自绘）

3 MR 辅助线性构件弯折与捆束装配

建立钢管模型后，可以拆解出各种不同弯折角度的单根钢管，笔者使用了 MR 设备 HoloLens 辅助加工钢管和组装置。

3.1 MR 辅助线性构件弯折

利用 HoloLens2 的 Holographic Remoting 和 Unity 平台结合，可以实现将 Rhino 中的模型同步到 MR 环境中。该过程的原理是通过二维码定位技术，将得 Rhino 中模型的坐标映射到 Unity 框架下的 MR 坐标中，并且维持实时动态更新。以此为基础，可以通过对现实中弯管机的建模并导入 MR 环境，实现虚拟与现实的同步。然后在 Rhino 中对弯管过程进行拆解，将每一次弯管后的模型依次同步到 MR 环境中，便可根据 MR 环境中的虚拟模型为参考，进行手动弯管。如图 14 所示，红色部分即为通过 HoloLens 眼镜中所看到的虚拟弯管器及钢管模型，根据二维码定位使虚拟弯管器模型与物理空间中的实际位置对应，便可以参考虚拟钢管模型对现实钢管进行加工，使其弯折到对应角度和长度，实现多种弯折角度的钢管加工。



图 14 MR 眼镜中的虚拟模型（图片来源：作者自摄）

3.2 MR 辅助线性捆束装配

通过相同的原理，我们对每根钢管进行系统化的编号与精确加工，随后在 MR 环境中进行预拼装实验。在 MR 环境中将钢管模型根据编号顺序逐一显示（图 15），该过程旨在模拟现实世界的拼装次序，从而辅助验证模型是否存在钢管间的碰撞问题，并检测安装次序是否合理。以此装置为例，为了优化预装配的便捷性，我们将装置拆解成了五个部分（图 16），拆分标准为确保每一部分均能构成自支撑结构，同时力求各部分形成闭环结构、各部分间的连接钢管数量较少，确保各部分组装合并时能够保持自身稳定，抵御钢管滑动、偏移等潜在问题对整体装配精度的影响。

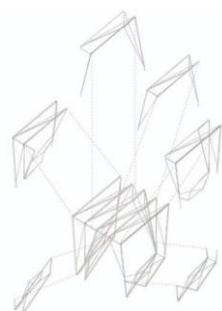
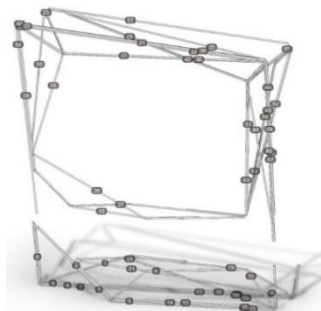


图 15 钢管模型编号（图片来源：作者自绘） 图 16 装置拆解示意图（图片来源：作者自绘）

在 MR 预装配实验完成后，我们对现实钢管装置进行组装。利用二维码定位出 MR 环境中装置的每根钢管的空间位置，依据编号精确找到对应钢管并逐一放置固定。我们以一捆钢管为单位进行组装，采用捆扎带作为固定手段以确保钢管束的稳固。在拼装次序的编排上，遵循钢管在现实工况下的受力优化原则，即首先进行底部钢管的安装，随后逐层向上推进，同时确保从一端向另一端有序延伸，且在条件允许下优先处理多根成捆的钢管。每一部分组装好的状态如图 17 所示，将各部分用捆扎带拼装固定便完成了装置的组装。

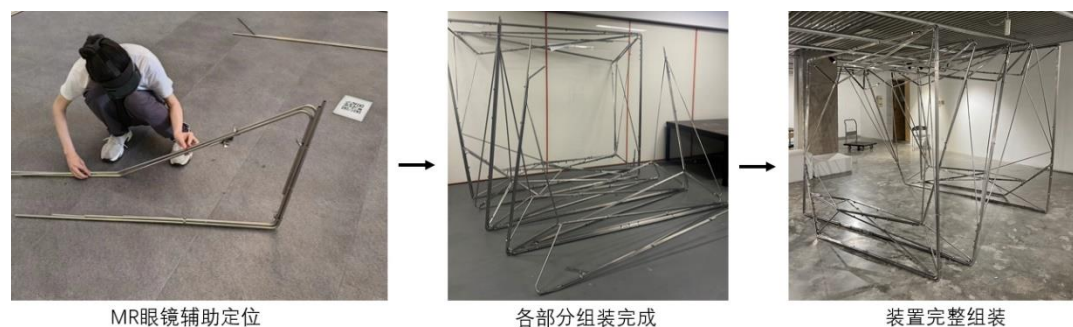


图 17 组装流程（图片来源：作者自绘）

4 结论

本文探讨了混合现实技术在捆束弯折空间结构中的设计与建造方法，成功实现了一个复杂的空间装置。通过捆束这一特殊建构方法，我们拓展了混合现实辅助弯折技术在大尺度结构中的应用潜力，尤其在提高结构受力性能方面具有较高的应用价值。本研究针对该建构方法，从几何逻辑与限制的角度进行了深入研究，总结了关键的几何原理。此外，本研究运用 MR 技术对整个空间装置进行了建造实验，验证了在几何限制条件下，混合现实设计与建造一体化的可行性。这一研究对未来大尺度空间结构的设计与建造具有示范作用，并为进一步应用混合现实辅助弯折技术推广奠定了基础。

参考文献

- [1] Zhang X, Peng Y, Zhao X, et al. Challenges of on-site implementation of mixed reality technology in the AECO industry[J]. Automation in Construction, 2024, 166: 105620.
- [2] Gentile A L. Holo-bending: holographic tube bending workflow for bio-inspired generative patterns[J]. 2021.
- [3] Jahn G, Newnham C, Van Den Berg N, et al. Making in Mixed Reality. Holographic design, fabrication, assembly and analysis of woven steel structures[C]//ACADIA//2018: Recalibration. On imprecision and infidelity. Proceedings of the 38th Annual Conference of the Association for Computer Aided Design in Architecture. Acadia, 2018: 88-97.
- [4] Jahn, Gwyllim & Newnham, Cameron & Berg, Nick & Iraheteta, Melissa & Wells, Jackson. (2019). Holographic Construction.
- [5] Jahn, Gwyllim & Newnham, Cameron & Berg, Nick. (2020). Collaborative Fabrication In Mixed Reality. 10.4324/9780367369156-82.
- [6] Jahn, Gwyllim & Newnham, Cameron & Berg, Nick. (2022). Depth Camera Feedback for Guided Fabrication in Augmented Reality.
- [7] GOEPEL G, CROLLA K. (2020) AUGMENTED REALITY-BASED COLLABORATION[J].