arXiv:2602.03743v1 [cs.HC] 3 Feb 2026

三维城市分析中用于时空可视化的无遮挡保形透镜

Roberta Mota、Julio D. Silva、Fabio Miranda、Usman Alim、Ehud Sharlin、Nivan Ferreira

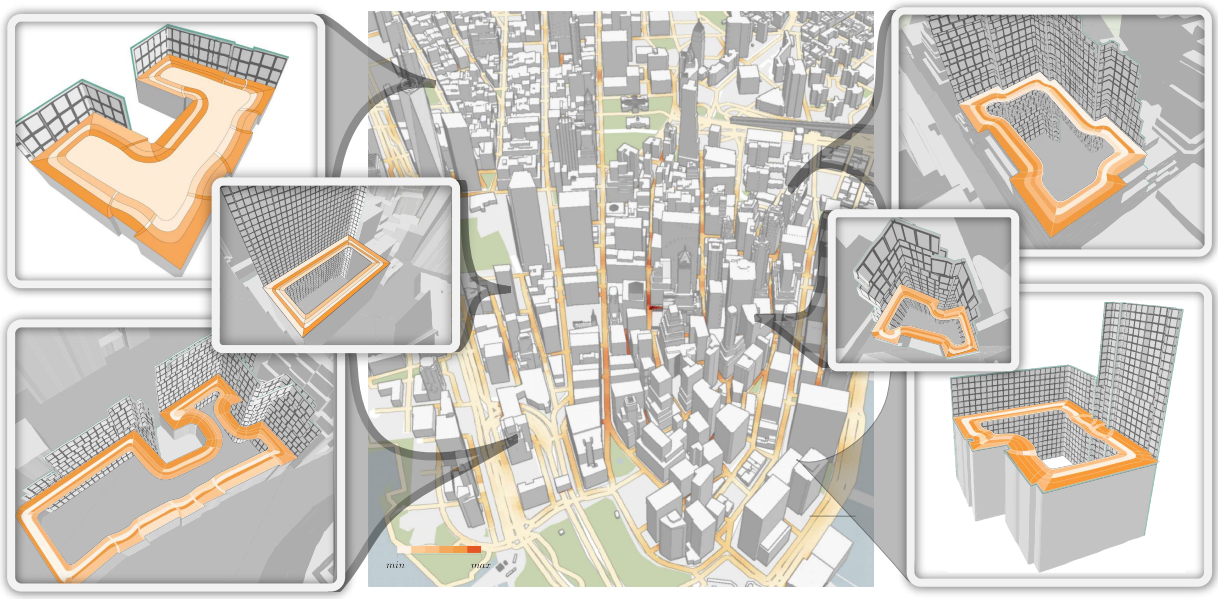


图 1：我们的透镜增强了三维城市可视化，加入了与建筑物轮廓无缝贴合的时间显示，同时抑制自遮挡几何体，确保聚焦的时间序列可视化具有不受阻挡的视线。透镜支持传统的离心视角分析，用户可从抽离的俯视角度查看数据；同时，它也专为自我中心视角分析而设计，使用户能够在沉浸式三维城市环境中探索时空数据。

摘要——在城市建筑上可视化时间数据（如阴影、噪声和太阳能潜力），对于分析动态城市现象至关重要。然而，在密集且地理空间受限的三维城市环境中，时变建筑数据的可视化表示往往会受到遮挡和视觉杂乱的影响。为应对这两项挑战，我们提出一种沉浸式透镜可视化方案，它融合了*i)* 视点依赖的剖切去遮挡技术，以及*ii)* 基于保角映射算法生成的时间显示。映射过程首先将不规则的建筑物轮廓划分为更小且足够规则的子区域，作为结构基元。随后，这些子区域将无缝重组，形成用于时间透镜可视化的保角分层布局。响应视点变化的剖切方式借鉴了传统建筑插图，在保留建筑及其周边环境整体布局的同时，维持用户的空间定向感。该透镜设计可按需在建筑立面上嵌入与形状自适应的时间显示，实现无遮挡呈现，从而支持快速建立时空关联，以发现、访问和解读城市时空模式。在领域需求和设计目标的指导下，我们阐述透镜视觉与交互设计选择背后的依据，例如如何在贴合的透镜图像中编码时间推移和时间值。我们通过一项受控用户研究，将该方法与传统并置设计和X射线时空设计进行比较。结果验证了透镜的实用性和效用，表明它能够提高任务准确性、缩短完成时间、减少导航努力并增强用户信心。基于这些发现，我们总结出设计建议，并提出空间嵌入式透镜在三维可视化、城市分析及相关领域中的未来研究方向。

索引词—焦点+ 语境、透镜、可视化、虚拟现实、沉浸式分析、城市分析、时空城市数据

1 引言

近年来，城市建筑时间数据（如阴影、噪声和太阳能潜力）的获取日益便利 [35]。这为时变建筑数据的创新可视化创造了机会，而这类数据在分析动态城市现象方面发挥着关键作用。尤其是，沉浸式可视化在城市视觉分析中日益受到关注 [9–11, 53, 55]，因为沉浸式技术使用户能够利用与生俱来的三维感知和交互能力来探索三维城市数据。尽管如此，在密集且地理空间受限的三维城市环境中，时变建筑数据的沉浸式可视化常常面临视觉杂乱和遮挡问题。首先，在建筑网格几何中可视化时变数据时，

• *Roberta Mota*、*Julio D. Silva*、*Usman Alim* 和 *Ehud Sharlin* 任职于加拿大卡尔加里大学。电子邮件：*{roberta.cabralmota, jd.silva, ualim, ehud}@ucalgary.ca*。
• *Fabio Miranda* 任职于美国伊利诺伊大学芝加哥分校。电子邮件：*fabiom@uic.edu*。
• *Nivan Ferreira* 任职于巴西伯南布哥联邦大学。电子邮件：*nivan@cin.ufpe.br*。

稿件收到日期：*xx xxx. 201x*；接受日期：*xx xxx. 201x*。出版日期：*xx xxx. 201x*；当前版本日期：*xx xxx. 201x*。如需获取本文的重印本，请发送电子邮件至：*reprints@ieee.org*。数字对象标识符：*xx.xxxx/TVCG.201x.xxxxxxx*

将所有信息纳入单一视觉图像颇具挑战，且往往会造成视觉杂乱，即过多的视觉信息使可视化难以解读。其次，可视化必须处理因自遮挡而被建筑几何遮蔽的数据，即建筑自身的立面相互遮挡。如果包含相关信息的立面部分或全部被遮挡，分析人员就必须反复切换摄像机视角，并在脑海中保留不同视角下的数据，以便在分析过程中构建整体心理模型，最终妨碍他们从数据中发现洞见。视觉杂乱与遮挡共同损害了时变建筑数据的可发现性、可访问性和可解释性。

为缓解这些问题，我们研究一种基于透镜的沉浸式可视化，这是一种焦点+上下文技术，使用户能够局部修改屏幕焦点区域底层数据的视觉表示 [47]。我们的透镜增强了可视化，加入符合建筑物轮廓的时间图，并抑制自遮挡的建筑几何，以保持通往时间显示的无遮挡视线（图1）。由此，我们的透镜可视化将空间数据与时间数据整合为单一无遮挡图像：叠加的透镜图像呈现时间变化，而建筑网格几何提供空间上下文。这旨在实现快速的时空关联，并最终促进时空模式的发现、获取与解读。我们的贡献可总结如下：

- 一种**映射技术**，用于生成适应建筑物轮廓不规则几何形状的保角映射。这些映射作为我们透镜可视化的几何布局。
- 一种**沉浸式透镜可视化**，通过减轻自遮挡与视觉杂乱来支持时变建筑数据分析。为此，该透镜整合了*i*）用于去遮挡的视点相关剖切，以及*ii*）源自保角映射算法并嵌入建筑内部的时间显示。
- 一项**受控评估**，用于验证我们的透镜可视化在实际、任务驱动的城市场景中的实用性。随后，我们提炼设计建议，以指导未来研究。

2 相关工作

本节回顾先前关于时空数据、遮挡管理以及透镜所采用的视觉设计策略的研究，涵盖传统环境与更具沉浸感的环境。

2.1 时空数据的可视化

Andrienko等人对面向时空二维数据的信息可视化进行了综述，并识别出两种视觉整合策略：关联视图与嵌入式视图 [3]。Chen等人随后将这一分类体系扩展至沉浸式空间中的三维城市数据 [11]。**关联视图**在多个相互分离的视觉空间中呈现空间数据与时间数据 [51],，因此会因视图之间的空间分离而带来认知负担，迫使用户在心理上将时间模式与其空间参照对象联系起来。此外，对额外屏幕空间的需求，在受有限视场约束的沉浸式环境（如头戴式显示器）中可能不利。**嵌入式视图**则相反，将空间数据与时间数据共置于同一视图中 [4, 46]。在城市可视化中，空间上下文通常通过城市几何形态来传达，例如建筑物轮廓，而叠加的时间图则描绘随时间发生的变化。尽管这种设计增强了时空对应关系，但它可能受到视觉杂乱和遮挡的影响。

此外，Kim等人的分类法将时空三维数据的科学可视化分为四种设计模式：并置、叠加、可互换和显式编码 [28]。**并置** 通过并排视图同时展示多个时间实例，每个实例都渲染在不同的坐标空间中 [27]。这种设计有助于进行时间比较，且不会增加用户的记忆负担，但会造成时空解耦，并带来屏幕空间分配方面的权衡，这与关联视图的局限性类似。**可互换** 设计一次渲染一个时间实例，通常通过用户交互或动画进行切换 [1]。所有实例都经过空间配准，并以完整比例显示。然而，用户必须依靠记忆在脑海中比较不同的时间状态。**叠加**在同一坐标空间中同时显示多个时间实例 [52]。这是唯一能够确保空间配准、同时可见性并保留原始数据的设计。**显式编码**不显示原始数据，而是转而派生出复合属性，例如两个时间步之间的差异 [49]。这种设计能够以完整比例呈现派生数据，但由于各个实例不可见，因此会限制可解释性。近期一项关于时空城市可视化的综述 [37] 显示，在三维场景中，可互换设计占据主导地位；而在二维可视化中，关联视图则更为常见。相比之下，我们的透镜结合了嵌入式和叠加策略，以促进三维城市可视化中更紧密的时空耦合。

2.2 被遮挡的 3D 数据可视化

Elmqvist与Tsigas的分类法将去遮挡策略分为五类：多视口、投影扭曲器、漫游规划器、体探针和*X*射线 [17]。**多视口** 通过两个或更多独立视图从不同视角显示目标对象，通常采用一个主视口搭配较小的次视图。尽管这种设计能提供全面的覆盖，但要彻底消除遮挡，就需要仔细进行相机放置；此外，由于用户必须在脑中整合不同视图中的视角信息，认知负荷往往也会增加 [6,9,12]。**投影扭曲器** 将多个投影视图合并到单个画面中，尽可能多地呈现被遮挡的目标。然而，这往往会导致感知上不一致的图像，使用户感到迷失方向 [55]。**漫游规划器** 通过预先设定或自动生成的相机路径，依次经过目标位置并逐一呈现 [18]。**体探针** 会根据用户控制的空间探针对对象空间进行变形 [9,10]。尽管这种方法能有效显示被遮挡的元素，但此类变形可能会扭曲周围的空间上下文。**虚拟X射线** 通过将遮挡几何体渲染为半透明或不可见来提高可见性 [32]。然而，这可能会削弱对物体深度及其空间关系的感知。我们采用视点依赖的*X*射线 设计，在揭示嵌入建筑物中的时间显示的同时，保留周围城市几何的充足空间上下文。

2.3 面向三维数据的透镜可视化

透镜的形状可分为固定 或动态两类。大多数透镜具有**固定**形状，通常采用圆形、圆盘或方框等基本形状，但对更复杂的几何形状并无严格限制 [22,38,44,50]。固定形状的透镜简单且为人所熟悉，有助于降低学习曲线。然而，它们可能无法贴合不规则的数据结构，导致相关特征覆盖不足、纳入无关特征，并增加认知负荷，因为用户必须手动加以区分。相比之下，一些透镜技术采用动态形状，可由用户或底层数据驱动其自适应。在**用户驱动的动态** 透镜中，形状通常通过描绘、刷选或套索选择等交互来指定 [29, 42]。这些方式能够更精确、更灵活地捕捉不规则特征，更好地反映用户意图。但这会增加交互成本，例如，在密集的三维空间中手动绘制可能变得繁琐。另一方面，**数据驱动的动态** 透镜会自动调整形状，以与边界、簇或路径等数据特征对齐 [24, 40]。这减少了用户工作量，便于自动特征发现，并可能通过确保透镜与数据有意义地贴合来提高可解释性。尽管如此，在噪声数据中其行为可能变得不可预测，很可能使用户难以理解自动生成的形状。我们的透镜采用数据驱动的自动化，使其形状适应建筑物轮廓，从而确保时间透镜图像与底层空间几何之间具有较强的空间一致性。

3 保角映射算法

问题定义。将时间数据展示嵌入建筑物面临的一大挑战，是透镜中通常采用的刚性规则形状（例如圆形或圆盘）与建筑物轮廓往往不规则的几何形状之间存在不匹配。为解决这一问题，我们的方法将轮廓划分为较小且形状足够规则的区域，使其能够充当

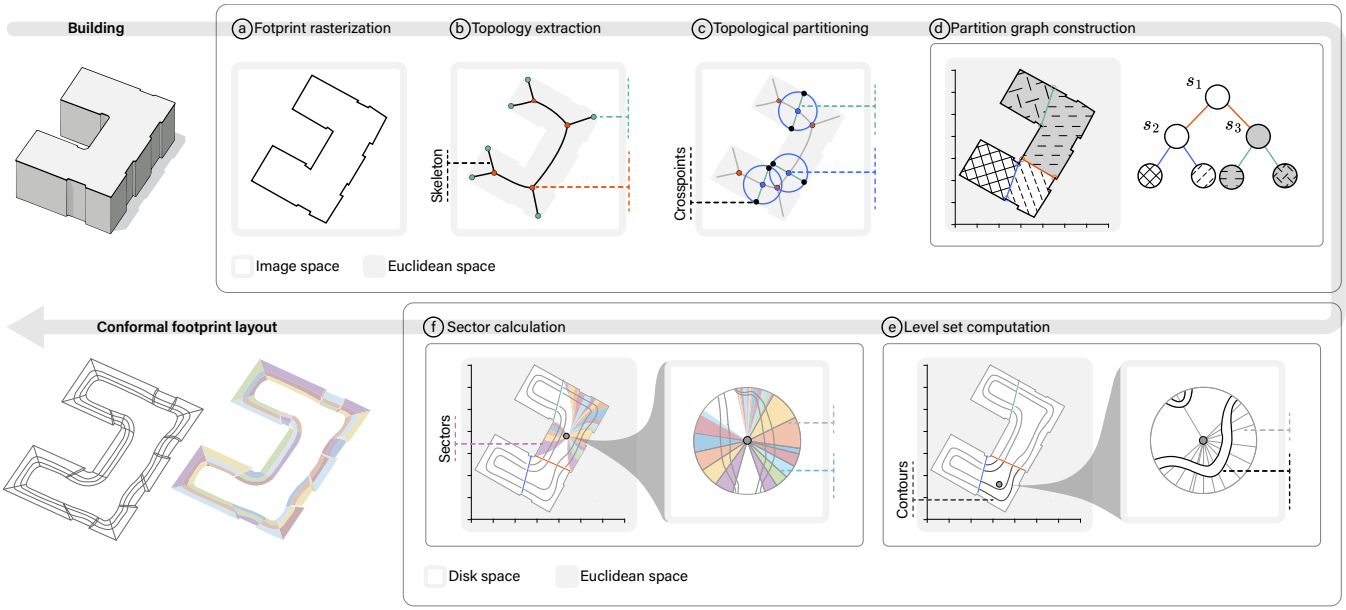


图 2：展示我们保角映射算法的流程。（上方）第一阶段将建筑物轮廓分解为更小的平行四边形近似。递归分解通过连续的细分S_i进行，每次都会引入更多多边形子区域及相应的图节点，最终形成分层拓扑图。（下方）第二阶段为每个分区计算保角映射，随后将它们拼接起来，形成统一的几何布局。

透镜可视化的结构基元。随后，这些分段会被无缝重新组合，形成贴合且一体化的视觉布局（图 2）。本节其余部分将概述该算法，更多细节请参见补充材料。

3.1 拓扑特征分区

映射算法的第一阶段本质上是一种启发式方法，其依据是建筑物轮廓通常由平行六面体构成这一观察。算法首先识别组成给定轮廓的平行四边形的拓扑特征，并将它们分割为有向图。为确保算法终止，需要移除建筑物轮廓中的环，以生成无环图。此初始阶段的主要步骤分别记为S_i，如下所示：

S_1. 拓扑特征提取。 为构建拓扑特征，我们首先将轮廓多边形栅格化为规则网格图像。接着，提取二值化图像的骨架 S_b，以及相应的交汇点和端点（图 2–*a,b*）。

S_2. 拓扑划分。 给定骨架图像及其交汇点和端点，我们按照最初的启发式假设，将轮廓分解为平行四边形。为此，我们注意到，通过中轴分析时，平行四边形呈现出简单的拓扑特征：它由两个三分交汇点和连接它们的一条中心线段组成，每个交汇点又分出两条支路，分别通向两个端点，从而形成一对相连的“Y”形。为了将轮廓分割为若干组成平行四边形，我们将交汇点集合中的每个三分点视为一个种子点。对于每一对种子点，我们识别连接它们的白色骨架线段 S_b。沿着这条线段，我们寻找一个像素点：其内切圆与多边形的两条相对边相交，且半径最小。我们将这个像素点称为切割点，并将经过该中轴点、连接这两个相对交点的线段称为切割线 （图 2–*c*）。

S_3。 分区图构建。 给定中轴切割线后，我们将原始轮廓多边形分割为一组互不重叠的子区域；根据基于中轴的分解启发式，每个子区域近似为一个平行四边形。随后将这些子区域组装成一个有向图$G = (V,E)$，其中每个节点 $v \in V$ 表示一个带有相应拓扑特征标注的子多边形，每条有向边 $e \in E$ 表示几何邻接关系（图 2–*d*）。

3.2 保角映射、等值线与扇区

映射算法的第二阶段使用施瓦茨–克里斯托费尔（SC）映射 [16]为图节点 计算保角映射。保角映射由两个部分组成：*i*)水平集，每个水平集由距建筑平面边界等距的点构成；以及*ii*)扇区，由将水平集划分为建筑物轮廓不同立面的曲线定义。本阶段的主要步骤如下：

S_4. 水平集计算。 设 $\mathrm{d}: W_k \to \mathbb{R}$ 表示足迹子区域 W_k 中某点到其最近边界点的距离，$\phi_k : D_k \to W_k$ 表示从单位圆盘 D_k到该区域的 SC 保角映射。我们通过将距离函数拉回圆盘来计算水平集：$d_k(z) = d(\phi_k(z))$，其中 $z \in D_k$。随后，通过以下步骤构建目标距离 d_W 处的等值线：i) 在 D_k中采样一组间距均匀的点，ii) 找出满足 $d_k(z_i) = d_W$的点 z_i，iii) 通过 ϕ_k将这些点映射到 W_k。对多个距离水平重复此过程，可将 W_k 划分为嵌套式保角带状区域（图 2–e）。

S_5. 扇区构建。 为了定义足迹子区域中两个相邻边界点 $w_1, w_2 \in W_k$之间的扇区，我们在参数圆盘 D_k中计算它们的原像 $z_i = \phi_k^{-1}(w_i)$（$i = 1,2$）。将各 z_i 表示为极坐标，可得到角度值 θ_1 和 θ_2，它们定义了从圆盘中心出发的两个径向方向。沿这些方向采样点，并通过 ϕ_k 将其映射回 W_k，即可得到扇区曲线（（图 2–f）。

S_6。 水平集拼接。 最后，我们将定义在各个图节点上的保角映射合并为一个统一的几何布局。具体做法是通过共享边界上的匹配点，连接相邻节点之间的水平集线段。由于相邻节点在轮廓上共享公共边，其对应的水平集会在公共点处相交，从而确保整个轮廓上的保角布局连续且协调一致。

4 可视化

我们的透镜可视化旨在促进跨建筑立面的时空分析；因此，在通过我们的映射算法计算出保角布局后，我们会将时间显示叠加到建筑上。本节阐述指导我们方案的领域背景与设计目标，并说明与这些目标相契合的视觉和交互设计背后的依据。

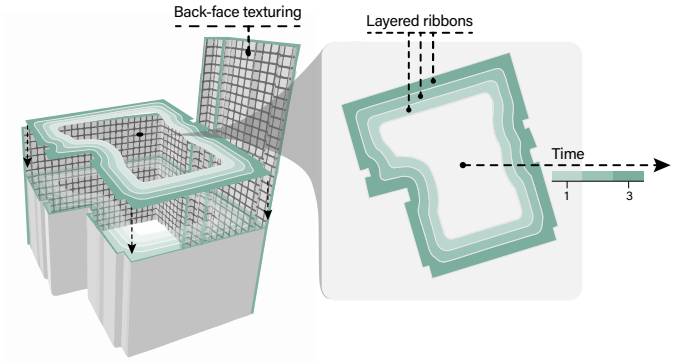


图 3：双面剖切渲染（左）以及采用分层带状结构编码不同时间实例的保形透镜布局（右）。

4.1 领域与设计目标

先前研究已确定以下时空分析任务 T_i，这些任务通常在三维城市空间中执行 [35, 37]：

T_1. 跨建筑立面的空间比较。在三维城市模型中，可视化分析通常由空间维度而非时间维度驱动。从这个意义上说，空间比较任务涉及多个已知空间位置，同时探究未知的时间值。例如，任务可能包含以下问题："不同立面之间的阴影行为有何差异？"或"冬季期间哪座建筑立面接收到的阴影最多？"

T_2. 建筑立面中的时间比较。另一项常见任务是时间比较，即在单个已知空间位置评估多个时间实例。例如，可以比较给定立面在夏季和冬季之间的阴影行为："该立面在哪个季节接收到的阴影最少？"

基于上述分析任务，我们为沉浸式透镜可视化制定了以下设计目标 DG_i：

DG_1. 将时间信息锚定到空间参照对象。由于这些任务要求将时间值与相应的空间参照对象关联起来，我们使用保角映射算法，将时间显示精确地叠加到建筑上，从而实现原位分析，并在空间与时间之间保持无缝一致性。

DG_2. 减轻空间位移。在嵌入时间显示时，宜尽量减少对相邻空间的干扰，以保持用户的空间定向感；空间定向已被确认为三维城市数据分析中的关键因素 [9]。为此，我们设计了一种X射线式去遮挡方法，它不仅能为时间图提供清晰的视线，还能尽量减少对建筑结构及其周边环境的改动。

DG_3. 优先可视化时间趋势与极值。领域专家经常考察极端时间值（例如，"夏季哪一面立面受到的阴影最多？"），以及时间趋势（例如，"某一立面全天的太阳入射变化是否很小？"） [37]。因此，我们的视觉设计侧重于帮助感知整体趋势与极值，而非呈现具体数值。

DG_4. 面向简洁与直观进行设计。由于我们不对用户的背景知识或技能水平作假设，我们的设计以直观性和简洁性为指导。为此，我们考虑了一系列利用人类认知与运动能力以及现实世界知识的设计选择。例如，我们的去遮挡设计是一种受著名建筑图示启发的视点相关剖切，它利用人类在心理上重建缺失空间结构的自然认知能力。

4.2 可视化设计

在设计目标的指导下，我们针对时空透镜可视化中的后续设计考量进行了处理。

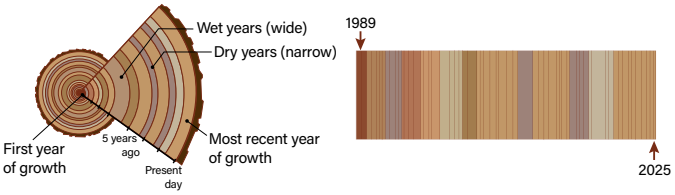


图 4：树轮年表（左）以及展示高密度时间数据的横截面视图（右）。

空间去遮挡。 一个主要的设计决策涉及如何处理建筑中的遮挡，以确保能够清晰地看到嵌入式时间显示。受传统说明性建筑可视化的启发，我们采用 剖切视图，因为它们能够保留建筑整体的外部布局（DG_2），同时利用人类的认知能力，在心理上重建被剖切掉的空间结构（DG_4） [30]。剖切视图属于 X射线去遮挡技术，其固有的空间深度线索有限，最终阻碍了人们感知时间显示与建筑表面层之间的空间关联。尽管内部阴影能够提供强有力的消歧线索，但我们选择省略这些阴影，以避免其可能干扰对颜色编码的时间值的感知。相反，我们对建筑的内表面和外表面采用了 distinct 的视觉样式，这不仅突出了剖切部分，还为用户理解空间布局提供了足够的空间线索，如图 3–左所示。此外，我们的剖切视图被设计为 视点依赖的 （DG_4）。在传统的焦点与上下文／透镜可视化中，视点依赖性通常只是次要考量，因为传统显示通常会占据用户的全部注意力，只有当用户明确选择新的关注区域时，焦点才会发生转移。相比之下，在沉浸式环境中，即使用户在空间中进行实体移动，用户选定的焦点仍可能保持相关。因此，视点依赖的

去遮挡设计通过让透镜更好地预测并贴合用户意图，确保感兴趣区域持续可见，从而减少手动输入的需求。这种动态响应利用人类天生的运动能力来协调并行动作：头部和全身运动调节透镜可见性，同时双手可用于辅助性的透镜交互（DG_4）。

时间方向。 将时间显示嵌入建筑物会带来一个挑战：如何传达时间推移的方向。

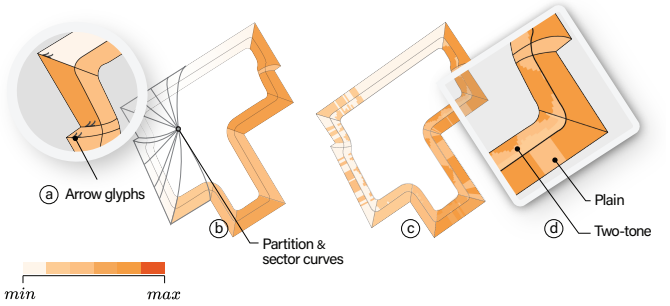


图 5：采用粗略（b）和精细（c）分辨率的颜色编码透镜可视化。与截面曲线对齐的箭头图形表示时间进程（a）。图中展示了两种沿带状区域编码时变属性值的方案：纯颜色编码更节省空间，而双色伪彩色可提升感知精度（d）。



图 6：透镜函数在双色伪彩色中调节所选属性范围视觉显著性的示意图：低值范围会被弱化，以在视觉上突出高值区域。

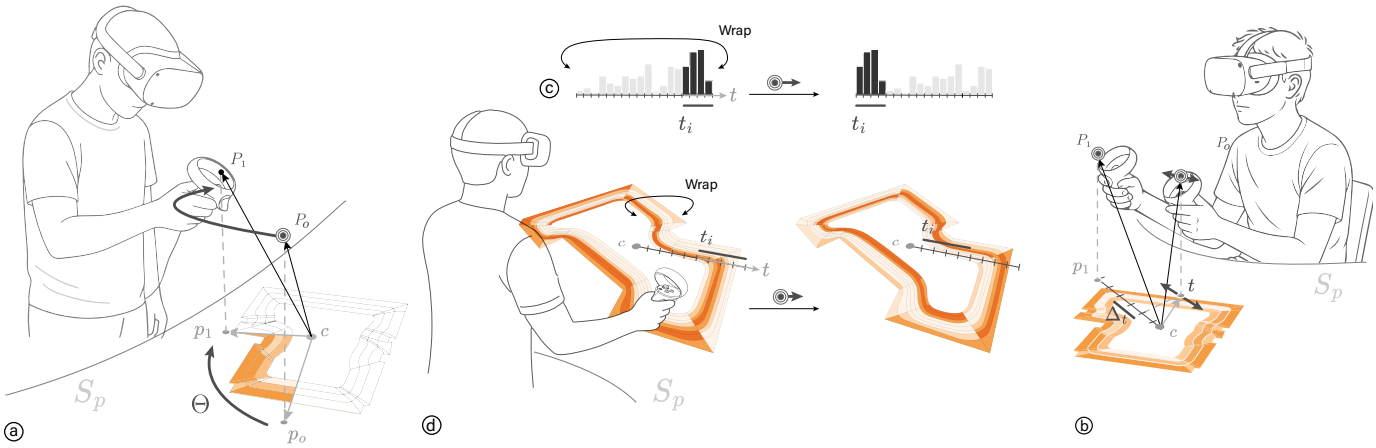


图 7：透镜交互示意图。(a) 用任意一只手执行角向拖动手势 $\overrightarrow{P_0P_1}$ ( ), 将拖动轨迹投射到虚拟桌面 S_P 上，从而通过聚焦相应的覆盖区域扇区来进行空间筛选。(b) 在位置 P_1 ( ) 按下扳机键，可显示时间轴，并将其端点 p_1 设在桌面表面上。随后，用任意一只手从 P_0) 开始径向拖动，即可沿时间轴进行时间导航，并在透镜图像中显示不同的时间间隔 Δ_t 。(c、d) 使用拖拽手势（ ）对时期数据进行环绕式时间重排序的示例比较，分别展示于条形图和我们的透镜可视化中。这种环绕交互旨在提升时间趋势的可读性，帮助发现时间趋势，例如相邻带状区域中的时间值单调递增序列。

虽然基于线性坐标轴的可视化通常采用的方向（例如，根据笛卡尔坐标系，时间从左向右或从下向上推进）直观易懂，但并不直接适用于我们这种特定的保角空间嵌入式可视布局。抽象可视化中也常采用径向布局，传达时间方向的主要策略有三种：基于环形、填充空间和基于极坐标的编码 [21]。在基于极坐标的设计中，中心点代表坐标系的原点，任意点与中心点之间的距离表示时间语义。因此，时间推移通过从中心或中心附近向外延伸的射线来表示。基于极坐标的布局直观易懂，因为它们与自然界中许多时间现象相呼应，例如水中的涟漪、冲击波和树木年轮，如图 4 (**DG**$_4$)所示。因此，我们采用基于极坐标的时间轴，不仅因为它应用广泛且易于直观理解，还因为它能将时间属性值线性排列，并使其与空间参照对象紧密相邻（**DG**$_1$）。具体而言，我们的时间显示围绕嵌套式保角带状区域这一概念进行设计，每个带状区域代表一个独立的时间实例，并通过对带状区域进行适当的基于极坐标的排序来编码时间方向，如图 3–右所示。

虽然我们认为现实世界类比能够有效传达时间顺序，但也可以考虑叠加额外的视觉提示，以进一步强化时间参照框架和用户的心理模型。从这个角度来看，标签和符号等视觉元素常用于消除时间方向上的歧义；其中，箭头图形广泛应用于抽象和空间可视化中。尽管已有充分研究表明，字形采样策略会显著影响视觉杂乱程度以及对编码信息的感知 [7], 但深入讨论这一主题超出了本文的范围。尽管如此，我们认为可以策略性地放置方向性简洁字形，并使其方向与足迹扇区边界的曲率一致，所依据的曲线由我们的映射算法计算得出。这种对齐方式或可提升底层足迹布局的可读性，同时尽量减少对用于时间编码的视觉变量的干扰（见图 5–*a*）。

时间编码。另一项设计考量是为表示时间属性选择合适的视觉编码。鉴于领域专家经常检查定义在建筑几何上的标量时间函数，我们的设计构想倾向于表示此类数据。一种直接的方法是采用颜色映射，将时间属性值映射到颜色饱和度通道；这种编码已广泛应用于三维城市数据可视化中，如图 5–*b, d* [37]所示。众所周知，人类在从颜色中提取定量信息时，感知能力和准确度有限；不过，颜色仍是一种熟悉且适当的表示方式，可用于传达总体趋势和极值（**DG**$_3$）。尽管如此，为提升图形感知，我们可以考虑其他节省空间的颜色编码方法。例如，双色伪彩色等技术 [43, 48] 通过在空间上压缩信息，实现更精确的数值区分，如图 5–*c, d*所示。然而，这种方法对视觉基底的厚度十分敏感；也就是说，当带状物厚度过度减小时，感知准确度可能会显著下降。为改善颜色区分，可以启用按需镜头调整，减弱所选属性范围的视觉显著性，从而让用户能够在视觉上突出或弱化感兴趣的时间特征（图 6）。

4.3 交互设计

近年来，城市数据凭借其固有的空间复杂性以及对协作分析的需求，已成为沉浸式分析颇具前景的应用领域 [11]。因此，城市可视化开始利用沉浸式技术的独特优势：*i*) 更广阔的立体视觉空间，*ii*) 多样的空间交互方式，例如 空中手势和实体交互物，*iii*) 客体中心与自我中心空间视角，*iv*) 以及共址或分布式协作环境 [2,9,10,19,20,31,55,56]。因此，尽管我们的透镜仍可用于传统显示器，但它的设计初衷是在沉浸式环境中支持时空城市数据分析，尤其是利用自我中心视角和空中空间交互。

全局交互空间。 在我们的沉浸式交互设计中，我们区分了全局和局部交互空间。对于前者，我们采用虚拟桌这一隐喻：在用户前方伸手可及之处，呈现一张虚拟复刻的工作桌 [54]。这种设计提供了灵活多变的工作空间，用户可以在桌面上与内容交互时四处走动或坐下（图7 和8–右）。这一隐喻还支持通过空中手势直接操控桌面上的内容，这些手势与熟悉的实体操作相仿：用户可以用任一只手通过按下扳机键并拖动来重新定位内容，也可以用双手通过扳机按压径向拖动手势缩放内容，向外拖动可放大，向内拖动可缩小。这些手势借助了人类现实世界知识（**DG**$_4$），从而提高生产力并降低任务复杂度，具体体现在：*i*）降低交互学习和执行过程中的认知负荷，从而释放心理资源用于

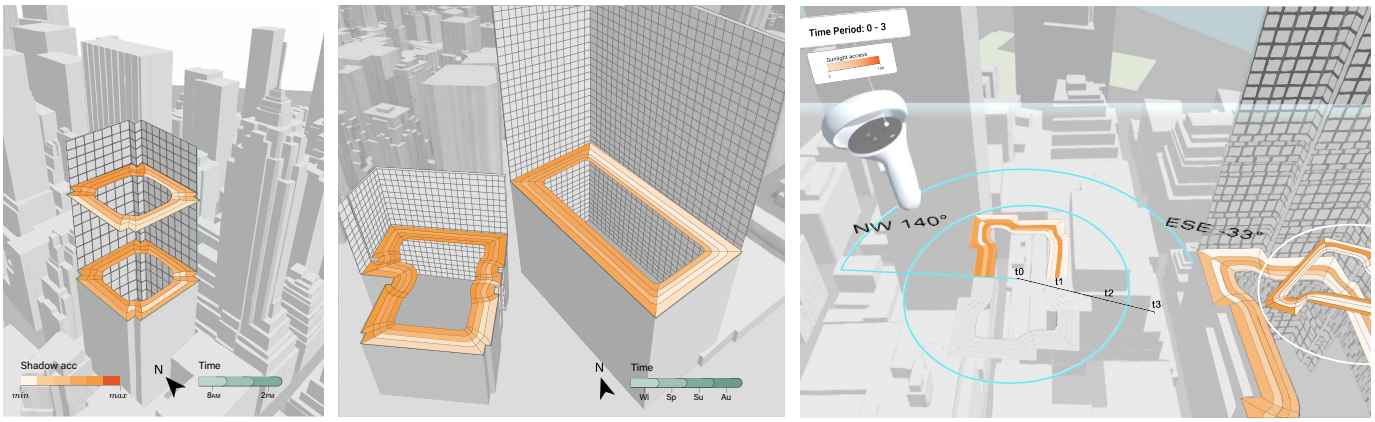


图 8：左侧和中间：展示透镜应用场景的示例，用于检查每日时间窗口和年度季节中的阴影累积。右侧：分布在半透明虚拟桌面上的透镜副本。青色圆圈表示活动的透镜交互空间，用户可在其中执行角度拖动，以查询涵盖从东南偏东 −33° 到西北 140°方向的空间扇区。

数据解读，*ii*）双手交互：用户熟悉实体操作，因此更容易组合多种操作；以及*iii*）减少情境切换，让用户无需注视即可进行交互，同时专注于当前任务 [23, 26]。

虚拟桌面包含用户控件以及相应三维透镜图像的紧凑型二维副本。这些副本类似于微缩世界模型；由于具备两项核心功能，这一隐喻被广泛应用于沉浸式环境中 [14, 45]。首先，副本提供了缩小比例的外中心视图，可作为大尺度自我中心虚拟环境的补充。默认情况下，副本在桌面上的摆放保留彼此的相对空间位置，从而便于空间定向，以及在二维表示与其三维对应物之间进行认知地图构建。其次，副本在触手可及的范围内，以缩小的比例充当局部交互空间，从而减少大幅度的手臂运动和头部旋转；在广阔的沉浸式环境中，这些动作可能降低空中交互的精度并增加疲劳 [25, 33]。

局部透镜交互空间。 用任一只手轻触透镜副本，即可激活其局部的 二维 交互空间。交互设计源于分层时间显示的视觉设计：径向轴上的颜色变化编码时间趋势，而角度轴上的变化则传达空间模式。同样，径向 手势，即从透镜中心向内或向外移动，会与时间 维度交互； 角度 手势，即围绕中心移动，则作用于空间维度；而 对角线 手势则同时作用于空间和时间维度。以下透镜交互以$\mathbf{I}_i$标记，用于补充时间图，以支持第4.1节中规定的时空任务。

$\mathbf{I}_1$。 空间筛选。 为便于比较属性行为（$\mathbf{T}_1$），用户可以使用 角度拖动手势构建空间筛选器：用任一只手按下扳机按钮，并沿角度维度拖动，用户即可将视觉焦点指向特定的覆盖区域扇区。这种手势设计不仅类似于现实世界中的动作，例如，转动头部或上半身进行角度扫视以观察房间；还可根据用户执行旋转手势时距中心的距离，实现不同程度的精度：靠近中心的手势会导致粗粒度选择，而远离中心的手势则能对空间筛选提供更精细的控制（$\mathbf{DG}_4$）（见图7–*a*）。

$\mathbf{I}_2$。 时间导航。 为分析时间行为（$\mathbf{T}_2$），用户可按下任一只手的握持按钮，沿径向轴拖动，从而沿时间维度进行导航。这种操作类似于张开或合拢双臂来估算尺寸等易于识别的手势（$\mathbf{DG}_4$）。该时间轴按需出现，从透镜中心延伸至用户指定的点，用户可借此调整轴长（见图 7–*b*）。调整轴长会直接影响 径向拖动 手势所能提供的精度。值得注意的是，用户可以在二维交互空间内通过连续的拖拽手势同时进行空间与时间筛选。

$\mathbf{I}_3$. 时间排序。 为支持周期数据的时间比较（$\mathbf{T}_2$），我们沿时间维度实现了一种环绕排序机制 [8]。在此，环绕指的是通过连接嵌套时间显示中的内外带状区域而实现的感知径向连续性。与传统的展开轴相比，环绕表示具有两大优势：*i*）将感兴趣的时间区间置于用户视野的中心；*ii*）能够连续呈现周期时间数据，消除视觉不连续性，避免用户为了辨识周期趋势而在脑中重新拼接不连续的时间片段（见图7–*c*）。因此，用户可以通过径向拖动手势连续地重新排列时间：从透镜图像中心向外拖动，或朝中心拖动，如图7–*d*所示。

$\mathbf{I}_4$. 属性过滤。 为将视觉焦点置于特定的颜色编码值范围（这对空间和时间比较均有帮助（$\mathbf{T}_1$,$\mathbf{T}_2$）），我们的透镜提供了一项功能，可调节特定值区间的视觉显著性，如图6所示。用户点击虚拟桌面中颜色图例的相应色块，即可触发这种基于颜色的过滤。

$\mathbf{I}_5$. 属性排序。 默认情况下，透镜条带按时间顺序排列，以呈现时间进程；不过，其他排序标准也可能很有用，例如，按平均温度对带状区域排序，有助于比较不同立面之间的空间差异（$\mathbf{T}_1$），从而发现温度极高或温度差异显著的立面。为启用此类基于属性的重排序，用户可以点击虚拟桌面上的下拉菜单和切换控件。

4.4 应用场景

本节介绍了我们用于纽约市阴影分析的透镜可视化的两个应用场景，如图所示8，并与第4.1节中描述的时空任务相关联。

建筑立面的跨高度空间比较。 在密集的城市环境中，由于周边摩天大楼投下的阴影，遮阴分布可能会沿着一栋建- 筑物的高度显著变化 [36]。为了了解跨高度的阴影行为（$\mathbf{T}_1$），我们考察一座办公塔楼在一天中三个不同时间段（上午、下午和午后）累积的阴影。该塔楼高 227 米，共 47 层。它位于金融区，是下曼哈顿最密集的区域之一，周围环绕着高度相近的中高层办公楼。通过沿着建筑楼层移动透镜，或放置两个或更多透镜（图8–左），我们可以比较不同高度立面上的日间阴影行为：朝北立面的阴影值全天及各建筑高度上始终较高，表明其对高度的敏感度较低。相比之下，朝西和朝南立面的阴影值从上午晚些时候到午后最低。这些

立面呈现出更显著的高度相关差异：高层的阴影值低于中层，这表明即使是处于中等高度、较易受阳光照射的立面，也可能因周边建筑遮挡阳光而持续处于阴影中。

建筑立面的跨季节时间比较。比较不同季节的阴影情况十分重要，因为季节变化会显著影响照射到建筑立面上的日照量 [34]。从人体健康的角度来看，夏季的阴影有助于提升热舒适度，但长期的季节性遮阴会减少室内日照可达性，并对居住者的心理健康产生不利影响。从建筑能耗的角度来看，季节性阴影行为会直接影响供暖和制冷需求，例如，夏季遮阴增加会降低室内温度和空调使用量。为了解跨季节的阴影行为（$\mathbf{T}_2$，我们考察了下曼哈顿滨水区附近两栋相邻建筑在四季中的累积阴影：一栋大型办公塔楼，高约 210 米，共 53 层；另一栋较矮的办公楼，高约 110 米，共 27 层。在两栋建筑离地高度相近的位置各放置一个透镜（图 8–右侧），可以观察到，北向立面的季节变化较小，全年都受到严重遮阴。相比之下，南向立面的季节性波动显著，累积阴影值从冬季的较高水平大幅降至夏季的较低水平。得益于邻近开阔滨水区带来的日照可达性提升，东向立面的累积阴影低于其他立面。然而，图中显示，夏季较矮的办公楼仍有较高的累积阴影，这可能是因为稍偏东北方向的高塔楼投下了阴影。

5 评估

本节介绍了一项用户研究，旨在评估我们的沉浸式透镜可视化的有效性。研究采用被试间设计，并设置了一个分析情境，要求用户完成第 4.1节所述的可视化任务。本研究已获卡尔加里大学研究伦理委员会批准 [REB21-1659_REN3]。

可视化。 文献中描述了多种适用于城市数据分析的时空可视化和去遮挡可视化设计。为确保研究范围切实可行，我们根据以下标准缩小了选择范围：所选技术应当 *i*）在城市领域得到广泛应用，*ii*）依赖相同的视觉编码通道，且 *iii*）提供同等程度的交互性。因此，我们将自己的可视化与常用的可互换和*X*射线 技术进行比较，其组合形成以下设计条件，分别标记为 $\mathbf{V}is_i$，并见图 9：$\mathbf{V}is_1$。`TemporalJX`（基线）一次显示一个数据实例，用户使用右摇杆在不同时间步之间切换。时间依赖的定量属性通过顺序色图编码。 $\mathbf{V}is_2$。`TemporalJX+Xray` 可显示所有建筑立面上的数据，但不支持同时显示不同时间实例。它采用与基线条件相同的颜色编码和时间切换交互方式。 $\mathbf{V}is_3$。`EmbeddedV+Xray`可显示建筑各侧的数据，并同时呈现所有数据实例。它采用与其他条件相同的颜色编码。

交互。 这些可视化设计支持等效的交互：*i*) 通过头部和身体动作控制相机；*ii*) 通过右摇杆切换时间，仅$\mathbf{V}is_1$ 和$\mathbf{V}is_2$；以及*iii*) 分别通过左摇杆和扳机键在用户界面中选择并提交任务答案。未使用透镜副本及相关交互。为隔离不同可视化设计的影响，我们将交互限制在最小范围内，从而避免基于复制体的交互性带来的混淆效应。

数据集。 我们使用了公开的曼哈顿 OSM 模型 [39], ，其中建筑立面上的时间属性表示四个年度季节中每个季节连续八小时内累计的日照可达性。为增加数据变异性，我们添加了随机噪声。

参与者。 我们在各可视化条件下共招募了28名参与者（8名女性和20名男性）：$\mathbf{V}is_1$：9名，$\mathbf{V}is_2$：9名，以及$\mathbf{V}is_3$：

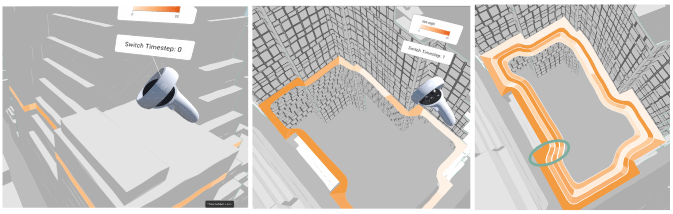


图 9：示例研究任务中的可视化设计。从左到右：`TemporalJX`、`TemporalJX+Xray`和`EmbeddedV+Xray`。绿色圆圈（右侧）标出了属性连续增长时间最长的立面，对应的任务答案是 $[t_0\text{-}\,t_3]$。

10名。无人报告有色觉缺陷，且所有人视力正常或矫正后达到正常水平。年龄范围为18至36岁（平均年龄 = 27 18, = 5 6 23 28 ，标准差 . ）。大多数参与者是在计算机科学或计算机工程专业就读的学生（ / ），曾使用过三维可视化（22/28）和虚拟现实（17/28）。所有参与者在参加研究前均提供了知情同意，自愿参与且未获得任何金钱报酬。

实验设备。 可视化使用 Unity 3D 和 Oculus Quest 2（每只眼睛的显示分辨率为 1832x1920）实现。我们使用搭载 Intel®Core TMi7 处理器和 GeForce RTX 3060 GPU 的笔记本电脑，获得了 45 FPS 的交互帧率。

实验流程。 每场实验分为三个部分：介绍与训练阶段、正式试次和研究后问卷，总时长为 60–90 分钟。在介绍与训练阶段，我们说明了实验目的以及将使用的可视化。随后，参与者完成了三个训练试次。在正式试次中，他们回答了六个问题，且不会收到答案正确与否的反馈。我们要求他们在不牺牲准确度的前提下尽可能快速作答。

任务。 本研究旨在评估我们的可视化设计在支持分析自遮挡和随时间变化的数据方面的有效性。因此，我们将这些方面整合为一项任务，要求参与者*i*）访问部分或完全被遮挡的数据，以及*ii*）关联数据随时间的变化。参与者需要[1]：“在参考建筑中，属性在哪个时间范围内持续增长的时间最长？”。图9 展示了一个示例任务：参与者首先分别查看各个立面，找出每个立面上属性值持续增长时间最长的时间范围；随后比较这些针对不同立面的时间范围，并选择总体上最长的时间范围作为最终答案。

度量指标。 对于每次试验，我们收集了两项性能指标的数据：*i*) 任务完成时间，从参与者看到试验界面时开始计时，至其提交回答时结束；以及*ii*)错误，定义为$e = 1 - \text{IoU}$，其中 IoU 指交并比方法，用于量化真实值与参与者所选时间区间之间的重叠程度。因此，数值越高，表示时间不匹配程度越大。此外，我们在每次试验过程中持续收集参与者的置信度作为主观指标，并记录其头部姿态作为客观指标。每次试验期间，我们还记录了与参与者行为、交互策略及其出声评论相关的定性观察。完成所有试验后，参与者填写了研究后问卷，分享正面和负面意见，以及改进可视化的想法。

假设。 基于上述四项指标，我们提出了四项假设以指导分析：$\mathbf{H}_{pos}$. 嵌入式 V+Xray 和 TemporalJX+Xray 可能比 TemporalJX 引起更少的头部姿态 变化，因为X射线去遮挡能够揭示立面级数据，从而减少对身体运动的需求。$\mathbf{H}_{ct}$. 完成时间 可能表现出类似的行为，并随所需身体-

[1]根据近期提出的三维城市可视化任务分类体系 [37]，此任务属于建筑楼层级趋势的时间比较类别。

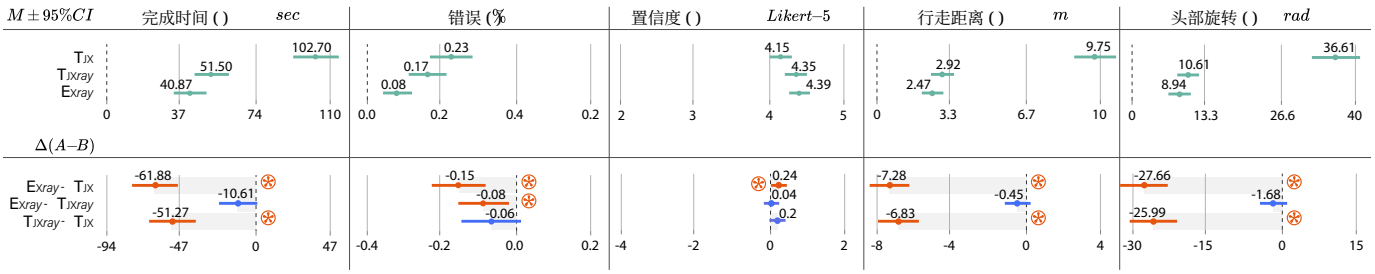


图 10：三种可视化条件下均值（上）与两两差值（下）的结果：嵌入式V+Xray（EX_{ray}）、TemporalJX+Xray（TJX_{ray}）和 TemporalJX（T_{JX}）。从左到右，各列分别报告所有任务的完成时间（秒）、错误（%）、置信度（李克特五级量表）、行走距离（米）和头部旋转（弧度）。误差线表示 95% 自助法置信区间。差异证据以橙色标记并附星号（离零越远且置信区间越窄，证据越强）。

运动和视点变化的多少而增加。**H**$_{err}$**.** 错误 可能随数据同时可见的程度而变化，其中嵌入式V+Xray的准确度较高，其次是TemporalJX+Xray，TemporalJX最低。**H**$_{conf}$**.** 置信度 可能以类似方式变化，置信程度反映数据的同时可见性。

6 结果

现在，我们报告并解读共 168 次试验中任务完成时间、错误、置信度和头部姿态方面的研究结果，如图10所示。我们的报告方法采用估计技术，报告样本均值及其置信区间 (CI)，而非p值统计 [13, 15], , 遵循推荐的实践 [5]。不过，p值方法也可通过类似技术从数据中得出。推断分析中，我们使用均值之间的两两差异及其 95% 置信区间[2], 来表示总体均值的合理取值范围。我们采用 BCa自助法构建置信区间，数据文件请参阅补充材料。

完成时间参与者使用嵌入式V+Xray的平均耗时较短（40.87秒，置信区间 = [33.05，49.25]），使用 TemporalJX+Xray的耗时略长（51.5秒，[43.24，60.24]）。使用 TemporalJX 时，任务完成时间显著增加（102.7秒，[91.7，114.4]）。两两比较有力地表明，TemporalJX 的速度显著慢于其他可视化，平均差异为 56.57 秒（置信区间 = [42.28，70.93]）。相比之下，没有明确证据表明两种基于 X 射线的可视化之间存在时间差异，即嵌入式V+Xray 和 TemporalJX+Xray。

错误 参与者的平均错误率在嵌入式V+Xray条件下最低，为8.17%（[4.47%，12.34%]）；在TemporalJX+Xray条件下上升至16.66%（[11.57%，22.06%]），并在

TemporalJX条件下达到23.3%（.43%，29.16%）。两两比较显示，我们的方法与另外两种基于时间并置的可视化方法之间存在显著差异：嵌入式V+Xray的准确率平均比TemporalJX+Xray和TemporalJX高11.83%（[4.93%，18.59%]）。

置信度 在基线条件TemporalJX下，平均置信度略低，为4.15（置信区间 = [4.0，4.29]），相比之下，TemporalJX + 4 35, [4 2, 4 5] + 4 39, Xray（.....）和[4 26, 4 54] 嵌入式V Xray（.....）的平均置信度更高。两两比较表明，嵌入式V+Xray与TemporalJX之间的置信度存在较小但显著的差异，平均差异为0.24分（[0.04，0.44]）。其他可视化方法对之间未发现差异。

行走距离 使用嵌入式V+Xray时，参与者的平均行走距离为 2.47m（[2.0，2.98]）；使用 TemporalJX+Xray 时，距离略长，为 2.92m（ [2.42，3.43]）。使用 TemporalJX 时，行走距离显著增加，参与者平均行走了 9.75m（[8.83，10.7]）。两两比较清楚地表明，TemporalJX 的行走距离显著高于 TemporalJX+Xray 和嵌入式V+Xray。

头部旋转参与者使用嵌入式V Xray时，平均头部旋转了 8 94 [7 13, 弧度（. .），而使用其他方式时略多 11 13] +

[2]差异的置信区间 若不跨越零，则表明存在差异。置信区间离零越远且越窄，证据就越有力。

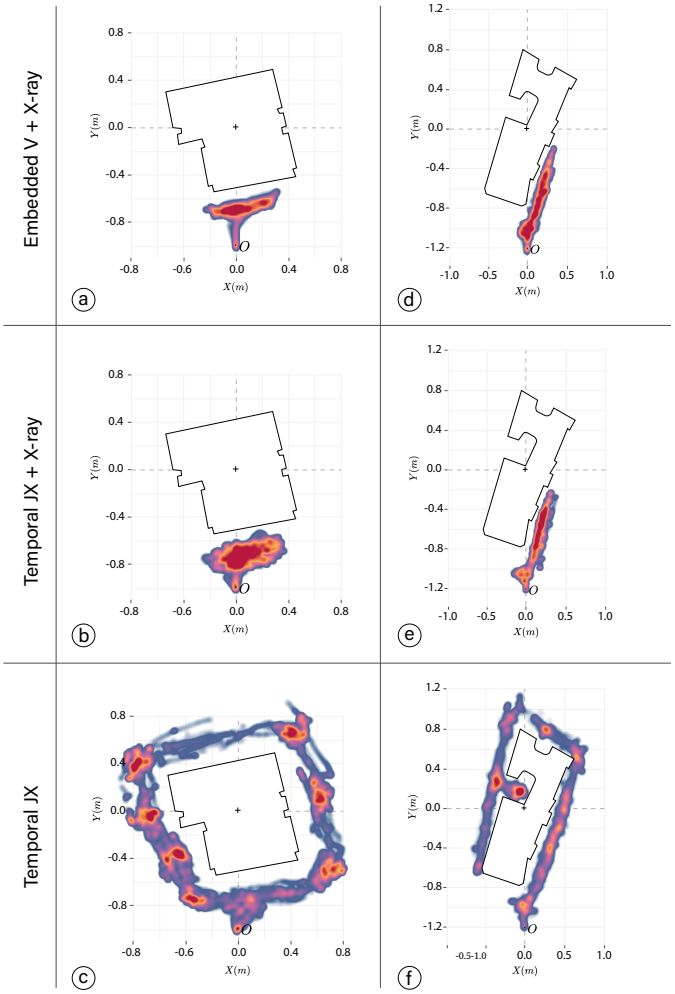


图 11：密度图展示了参与者在两项任务中各类可视化（行）中的位置（列），采用日落色散色图，从冷色调的紫蓝色过渡到暖色调的橙色和红色。原点 O 表示起始位置。

使用 TemporalJX+Xray 时（10.61 弧度， [8.81，12.52]）。使用 TemporalJX 时，头部旋转显著增加，平均达到 36.61 弧度（[32.39，40.88]）。两两比较显示，基于X射线的可视化与 TemporalJX 之间存在明显差异，而嵌入式V+Xray 与 TemporalJX+Xray 之间则未发现有意义的差异。

7 讨论

本节不仅讨论了三种视觉设计之间发现的定量性能差异，还结合了我们自己的

观察结果、问卷回答以及追踪到的头部姿态数据，对参与者使用每种可视化时的行为和策略进行了更全面的描述。我们将这些发现归纳为一系列设计建议 DR_i，旨在为可视化研究人员和从业者提供参考。

DR_1。 整合 *X*射线去遮挡，以减少空间导航，从而加快任务完成。我们发现，TemporalJX 与其他可视化方式在完成时间、行走距离和头部旋转方面存在显著差异，但 `TemporalJX` 与 `EmbeddedV+Xray` 和 `TemporalJX+Xray`之间没有明显差异。这可能表明，性能和身体活动方面的积极结果可能归因于它们具备 X射线功能。图11 中的密度图显示，`EmbeddedV+Xray`和 `TemporalJX+Xray`具有相似的导航行为，这揭示了 X射线去遮挡的优势：参与者在任务期间只需向前走几步，似乎就足以获得所有建筑立面数据的满意概览。因此，与使用 `TemporalJX` 相比，参与者使用基于X射线的可视化方式时，身体移动显著更少，响应所需时间也大幅缩短，这证实了 $\mathbf{H}^{pos}$ 和 $\mathbf{H}_{ct}$。

DR_2。 考虑跨空间协同可视化时间，以提升任务正确性和用户信心。与 TemporalJX 和 TemporalJX+Xray 相比，参与者使用 EmbeddedV+Xray 时的准确率显著更高。这一结果可能表明，同时协同可视化多个时间实例的能力，或许是提升任务正确性的关键因素。参与者使用 EmbeddedV+Xray 时的信心也略高于使用 TemporalJX 时。在研究后的问卷中，一些参与者表示，由于能够“一次看到所有内容”并“全面了解数据”，他们在整个研究过程中都感到高效且有信心；也就是说，他们能够同时查看并比较相邻建筑区域中的不同时间实例。这证实了 $\mathbf{H}^{err}$，并部分支持 $\mathbf{H}^{conf}$。

相比之下，参与者提到了使用`TemporalJX` 或`TemporalJX+Xray`时遇到的困难及其缓解策略。使用`TemporalJX`时，一些参与者提到，他们通过将自己置于有利位置，以便同时保持对多个立面的视线，来降低任务难度。在一些密度布局中，这种行为得到了一定体现：亮红色区域似乎经过策略性布置例如，位于建筑拐角处（见图11–*c*）。不过，他们也指出，在曲率较大的狭窄区域，这种策略可能会失效，因为视野受限，无法充分利用周边视觉来检查建筑的多个立面（见图11–*f*）。使用`TemporalJX+Xray` 时，一些参与者提到，他们通过逐步扫描每个立面上的数据，将数据与当前选定的任务答案进行比较，并在必要时更新答案，来降低任务难度。

DR_3。有利的时空 *X* 射线集成。结果令人鼓舞，因为我们提出的 EmbeddedV+Xray 设计在各项测试中均优于其他可视化条件。该技术似乎有效结合了两种设计策略的优势：*i*) 协同可视化时间步，有助于提高准确度；以及 *ii*) 基于 X 射线的去遮挡，可实现更快的响应。

DR_4. 设计应最大限度地提升时空中的数据可见性。 我们的研究结果表明，参与者始终致力于最大限度地提升数据的空间和时间可见性，采用的策略包括选择有利的空间位置，或利用任务答案追踪先前查看过的时间状态。这些行为凸显了同时降低身体和 mental 负荷的必要性，并指出了未来时空三维城市可视化的一项关键设计考量，无论是在沉浸式空间还是传统空间中皆是如此。

8 结论、局限性与未来工作

本文介绍了一种沉浸式透镜可视化，旨在促进时空三维城市数据的探索与分析。通过结合保角映射和视点相关去遮挡，我们的方法能够在统一空间中无缝整合空间信息与时间信息，促进快速建立时空关联，最终助力发现、获取和解读城市时空模式。受控评估验证了沉浸式透镜可视化的可用性和实用价值，并提供了实证证据，表明形状自适应嵌入和X射线去遮挡设计策略均有助于提升任务效率、减轻身体负担并增强用户信心。基于研究结果，我们总结了设计建议，以期为未来在可视化、城市研究及相关领域的研究提供参考。

局限性。 我们承认本研究存在一些局限。首先，我们当前的保角映射算法原型实现以离线 预处理步骤的形式运行，即，生成的静态布局无法动态重新计算。正如补充材料所述，这一局限源于我们使用了 Matlab 实现的 Schwarz–Christoffel（SC）算法（据我们所知，这是唯一可用的实现）。这一方案足以支持我们开展用户研究。我们将 SC 算法的重新实现，以及由此实现保角映射计算的完全交互性，留待未来工作。其次，我们的算法继承了底层 SC 公式的局限性；该公式已知存在数值不稳定性（例如拥挤现象），尤其是在细长或高度不规则的几何形状中（例如，具有多个锐角或深度凹入的建筑物轮廓），可能导致分层布局中的变形或带状区域间距不准确。尽管我们尝试通过分区和基于图的拼接来减轻这些影响，但局部 保角布局的保真度仍易受底层几何和数值不稳定性的影响。第三，出于可行性考虑，我们有意限制了用户研究的范围。我们的研究发现基于单一时间属性、数量有限的时空城市任务，以及少量时间和空间实例。因此，可能需要开展更多研究，以评估该可视化在其他城市模型、时空属性和任务中的泛化能力，以及其在更细时间或空间粒度下的可扩展性。这些研究或许能揭示不同的结果、用户行为和策略，最终有助于形成更具复用性和稳健性的设计指南。

未来工作。 一个很有前景的研究方向是探索基于图形符号的编码设计，或可采用分层策略，在单个透镜图像中呈现多个时间属性（例如风、温度和太阳辐射暴露，以考察夏季日间立面舒适度的变化），因为先前研究表明，将色彩映射与分层图形符号结合，能够有效实现光滑表面上多个属性的协同可视化 [41]。此外，尽管本文主要研究基于空间的视觉编码，未来我们计划在形状自适应透镜中探索时空主题表示。主题映射和空间映射都旨在以视觉方式传达数据属性，但它们服务于不同的分析目的。空间表示（例如颜色映射）通过保留数据的几何与拓扑保真度，增强真实感与空间推理。相比之下，主题映射侧重于更高层次的分析推理，通过抽象空间维度，凸显属性驱动模式，例如相关性、趋势、异常值和时间周期。此外，尽管三维空间会带来感知缺陷（例如遮挡和透视畸变），进而损害抽象可视化的可读性，但先前研究表明，在特定条件下（例如 近距离摄影视图以及光滑或平面表面），嵌入空间的抽象编码能够产生准确的结果，有时甚至优于熟悉的空间编码（如颜色映射） [37]。因此，融合空间与抽象范式，似乎是未来研究保形、嵌入空间的透镜可视化的一个有前景的方向。

9 致谢

感谢审稿人提出的宝贵意见，并感谢加拿大自然科学与工程研究委员会 [RGPIN-2025-04694、RGPIN-2019-05320、C GSD3-534866- 2019], 美国国家科学基金会 [资助项目编号2320261、2330565、2411223], 以及巴西国家科学技术发展委员会 CNPq [311425/2023-2]所提供的支持。

参考文献

[1] H. Akiba、C. Wang 和 K.-L. Ma。Aniviz：一种基于模板的体可视化动画工具。IEEE Computer Graphics and Applications，30 5 61 71, 2009 2 ( ): –。

[2] L. Alonso、Y. R. Zhang、A. Grignard、A. Noyman、Y. Sakai、M. ElKatsha、R. Doorley 和 K. Larson。Cityscope：一种面向城市设计的数据驱动交互式仿真工具。用例 Volpe。载于 International Conference on Complex Systems，第 253 261, 2018 5 –页。G. Andrienko、N. Andrienko、U.

[3] Demsar、D. Dransch、J. Dykes、S. I. Fab- rikant、M. Jern、M.-J. Kraak、H. Schumann 和 C. Tominski。空间、时间与可视分析。International journal of geographical information science，24 10 1577 1600, 2010 2 ( ): –。

[4] N. Andrienko 和 G. Andrienko。用于探索时空变化的交互式可视化工具。载于 Advanced Visual Interfaces Conference，第417–420页，2004年。2[5] A. P. Association 等。《美国心理学会出版手册》（ *2020* 2019 8 ）。American

[6] Psychological Association，。P. Baudisch、N. Good、V. Bellotti 和 P. Schraedley。保持事物处于上下文中：对焦点加上下文屏幕、概览和缩放的比较评估。载于 SIGCHI计算机系统人为因素会议，第 259 266, 2002 2 –页。R.

[7] Borgo、J. Kehrer、D. H. Chung、E. Maguire、R. S. Laramee、H. Hauser、M. Ward 和 M. Chen。基于字形的可视化：基础、设计指南、技术与应用。载于 Eurographics，第39–63页，2013年。5[8] K.-T. Chen、T. Dwyer、B. Bach 和 K. Marriott。旋转还是环绕？圆柱形或环面拓扑上周期数据的交互式可视化。IEEE可视化与计算机图形学汇刊，28(1)：727–736，2021年。6[9] S. Chen、F. Miranda、N. Ferreira、M. Lage、H. Doraiswamy、C. Brenner、C. Defanti、M. Koutsoubis、L. Wilson、K. Perlin 等。Urbanrama：在虚拟现实中浏览城市。IEEE可视化与计算机图形学汇刊，

28 12 4685 4699, 2021 1, 2, 4, 5 ( ): –。Z. Chen、H. Qu 和

[10] Y. Wu。通过爆炸视图实现沉浸式城市分析。载于 Workshop on Immersive Analytics: Exploring Future Visu- alization and Interaction Technologies for Data Analytics，2017年。1、2、5[11] Z. Chen、Y. Wang、T. Sun、X. Gao、W. Chen、Z. Pan、H. Qu 和 Y. Wu。探索沉浸式城市分析的设计空间。Visual Informatics，1 2 132 142, 2017 1, 2, 5 ( ): –。A. Cockburn、A. Karlson 和

[12] B. B. Bederson。概览+ 细节、缩放和焦点+ 上下文界面的综述。ACM Computing Surveys，41 1 1 31, 2009 2 ( ): –。G. Cumming 和 S. Finch。用眼睛进行推

[13] 断：置信区间以及如何阅读数据图。American psychologist，

60 2 170, 2005 8 ( ): 。K.

[14] Danyluk、B. Ens、B. Jenny 和 W. Willett。微缩世界的设计空间探索。载于 Proceedings of the CHI Conference on Human Factors in Computing Systems，第 1 15, 2021 6 –页。P. Dragicevic。HCI中的

[15] 公平统计交流。载于 Modern statistical methods for HCI，第 291 330 2016 8 –页。Springer，。T. A.

[16] Driscoll。算法：用于 Schwarz-Christoffel 映射的 MATLAB 工具箱。ACM Transactions on Mathematical Software，22 2 168 186, 1996 3 ( ): –。N.

[17] Elmqvist 和 P. Tsigas。面向可视化的三维遮挡管理分类。IEEE可视化与计算机图形学汇刊，14 5 1095 1109, 2008 2 ( ): –。N. Elmqvist、M. E. Tudoreanu 和

[18] P. Tsigas。用于探索三维虚拟环境的导览生成。载于 ACM Symposium on Virtual Reality Software and Technology，第 207 210, 2007 2 –页。C. Elvezio、F. Ling、J.-S.

[19] Liu、B. Tversky 和 S. Feiner。在虚拟现实和增强现实中协同探索城市数据。载于 ACM SIG- GRAPH Virtual, Augmented, and Mixed Reality，第 1 1 2018 5 –页。。B. Ens、S.

[20] Goodwin、A. Prouzeau、F. Anderson、F. Y. Wang、S. Gratzl、Z. Lucarelli、B. Moyle、J. Smiley 和 T. Dwyer。Uplift：一种用于非正式协作可视分析的有形沉浸式桌面系统。IEEE可视化与计算机图形学汇刊，27 1203，2020年 2 1193 5 ( ): –。

[21] V. Filipov、V. Schetinger、K. Raminger、N. Soursos、S. Zapke 和 S. Miksch。绕行一周：一种在数字人文领域可视化基于事件网络的径向方法。Visual Informatics，

5 1 45 60, 2021 5 ( ): –。R.

[22] Gasteiger、M. Neugebauer、O. Beuing 和 B. Preim。FLOWLENS：一种用于探索血流的焦点与上下文可视化方法在脑动脉瘤中。*IEEE* 可视化与计算机 Graphics，17 12 2183 2192, 2011 2 ( ): –。E. L.

[23] Hutchins、J. D. Hollan与D. A. Norman。直接操纵界面。载于《以用户为中心的系统设计》，第 87 124 1986 6 –页。。A. I

[24] on、Y.-L. B. Chang、M. Haller、M. Hancock与S. D. Scott。Canyon：在大型显示器的细节视图中提供多个运动对象的位置感知。载于SIGCHI计算机系统人为因素会议，第 3149 3158, 2013 2 –页。H. Iqbal、S. Latif、Y.

[25] Yan、C. Yu与Y. Shi。通过引入3 64104，2021年9 64085 6 D空间偏移减轻虚拟现实中的手臂疲劳。IEEE Access，：–。[26] R. J. Jacob、A. Girouard、L. M. Hirshfield、M. S. Horn、O. Shaer、E. T. Solovey与J. Zigelbaum。基于现实的交互：后WIMP界面的框架。载于SIGCHI计算机系统人为因素会议论文集，第 201 210, 2008 6 –页。S. Johnson、

[27] D. Orban、H. B. Runesha、L. Meng、B. Juhnke、A. Erdman、F. Samsel与D. F. Keefe。Bento box：一种用于在虚拟现实中可视化四维仿真集合的可交互、可缩放小倍数技术。《机器人与人工智能前沿》，

6 61, 2019 2 : 。K. Kim、J. V. Carlis与

[28] D. F. Keefe。空间三维与四维数据可视化中使用的比较技术：综述与未来方向。《计算机与图形学》，67 138 147, 2017 2 : –。U.

[29] Kister、P. Reipschläger、F. Matulic与R. Dachselt。Bodylenses：面向墙面显示的具身魔法透镜与个人领地。载于ACM交互式桌面与表面国际会议，第117–126页，2015年。2[30] A. Konev、M. Matusich、I. Viola、H. Schulze、D. Cornel与J. Waser。地下管状网络的快速剖切可视化。《计算机与图形学》，

75 25 35, 2018 4 : –。O. Lock、T. Bednarz与C. Pettit。

[31] Holocity——探索利用增强现实城市景观协作理解高体量城市传感器数据。载于 ACM SIGGRAPH虚拟现实连续体及其产业应用国际会议，第1–2页，2019年。5[32] J. Looser、M. Billinghurst与A. Cockburn。透过窥镜：将透镜用作增强现实界面的界面工具。载于计算机图形与交互技术会议，第 204 211, 2004 2 –

[33] 页。D. Mendes、F. M. Caputo、A. Giachetti、A. Ferreira与J. Jorge。三维虚拟物体操作综述：从桌面到沉浸式虚拟环境。载于《计算机图形论坛》，第 38， 21 45, 2019 6 卷，第–

[34] 页。F. Miranda、H. Doraiswamy、M. Lage、L. Wilson、M. Hsieh与C. T. Silva。阴影累积图：随时间高效累积城市尺度阴影。IEEE可视化与计算机图形学汇刊，25 3 1559 1574, 2019 7 ( ): –。F. Miranda、T. Ortner、G.

[35] Moreira、M. Hosseini、M. Vuckovic、F. Biljecki、C. T. Silva、M. Lage与N. Ferreira。

3 43 3 15112, 2024 1, 4 维城市数

[36] 据可视分析的最新进展。《计算机图形论坛》，( ): e。G. Moreira、M. Hosseini、M. N. A. Nipu、M. Lage、N. Ferreira与F. Mi- randa。Urban Toolkit：面向城市可视分析的基于语法的框架。IEEE可视化与计算机图形学汇刊，30 1 1402 1412, 2023 6 ( ): –。R. Mota、N. Ferreira、J. D. Silva、

[37] M. Horga、M. Lage、L. Ceferino、U. Alim、E. Sharlin与F. Miranda。面向三维城市分析的时空可视化比较。IEEE可视化与计算机图形学汇刊，

29 1 1277 1287 2, 4, 5, 7, 9 ( ): –。R. C. Mota、A. Rocha、J.

[38] D. Silva、U. Alim与E. Sharlin。用于虚拟环境可视化的3De交互式透镜。载于 IEEE可视化会议，第 21 25, 2018 2 –页。OpenStreetMap。

[39] 关系：曼哈顿版本#46。https://www. openstreetmap.org/relation/8398124，无日期。[在线；访问于 2025] 7 。C. Pindat、E. Pietriga、O. Chapuis与

[40] C. Puech。Jellylens：内容感知自适应透镜。载于ACM用户界面软件与技术研讨会，第 261 270, 2012 2 –页。A. Rocha、U. Alim、J. D.

[41] Silva与M. C. Sousa。Decal-maps：在表面上实时分层贴花以实现多变量可视化。IEEE可视化与计算机图形学汇刊，23(1)：821–830，2016年。9[42] A. Rocha、J. D. Silva、U. R. Alim、S. Carpendale与M. C. Sousa。Decal-lenses：用于多变量可视化的表面上的交互式透镜。IEEE可视化与计算机图形学汇刊，25 2582，2018年8 2568 2 ( ): –。

[43] T. Saito、H. N. Miyamura、M. Yamamoto、H. Saito、Y. Hoshiya与T. Kaseda。双色伪彩色：一维数据的紧凑可视化。载于IEEE 信息可视化研讨会，第173–180页，2005年。5[44] M. Spindler、S. Stellmach与R. Dachselt。Paperlens：桌面上方的高级魔法透镜交互。载于ACM交互式桌面与表面国际会议，第 69 76, 2009 2 –页。R. Stoakley、M. J. [45] Conway与R. Pausch。WIM上的虚拟现实：交互式微缩世界。载于SIGCHI计算机系统人为因素会议论文集，第 265 272, 1995 6 –页。G. Sun、R. [46] Liang、H. Qu与Y. Wu。通过路径缩放将时空信息嵌入地图。IEEE可视化与计算机图形学汇刊， 23 5 1506 1519, 2016 2 ( ) : –。C. To [47] minski、S. Gladisch、U. Kister、R. Dachselt与H. Schumann。用于可视化的交互式透镜：扩展综述。36 200，2017年6 173 2 ( ) : –。[48] C. Tominski、H. Schumann、G. Andrienko与N. Andrienko。基于堆叠的轨迹属性数据可视化。IEEE可视化与计算机图形学汇刊， 18 12 2565 2574, 2012 5 ( ) : –。M. K. [49] Tory、T. Möller与M. S. Atkins。面向多发性硬化病灶分析的时变MRI数据可视化。 4319 590 598, 2001 2 : –。M. Trapp、T. [50] Glander、H. Buchholz与J. Döllner。用于虚拟城市模型交互式焦点+ 上下文可视化的D泛化透镜。载于IEEE信息可视化会议，第 3 356 361, 2008 2 –页。C. [51] Turkay、A. Slingsby、H. Hauser、J. Wood与J. Dykes。属性签名：用于分析多变量地理数据的动态可视化摘要。IEEE可视化与计算机图形学汇刊， 20 12 2033 2042, 2014 2 ( ) : –。R. Van Pelt、R. Gasteiger、K. Lawonn、 [52] M. Meuschke与B. Preim。用于脑动脉瘤治疗评估的比较性血流可视化。 33 3 131 140, 2014 2 ( ) : –。J. Wagner、C. T. Silva、W. St [53] uerzlinger与L. Nedel。通过沉浸式时空立方体隐喻重新构想taxivis，并反思沉浸式分析对城市数据探索的潜在益处。载于2024年IEEE虚拟现实与三维用户界面会议（虚拟现实），第 827 838 2024 1 –页。IEEE，。J. A. Wagner Filho、 [54] C. M. D. S. Freitas与L. Nedel。Virtualdesk：一种舒适高效的沉浸式信息可视化方法。载于《计算机图形论坛》，第 37, 415 426, 2018 5 卷，第–页。M.-L. [55] Wu与V. Popescu。通过多视角遮挡管理实现高效的虚拟现实与增强现实导航。IEEE可视化与计算机图形学汇刊， 24 12 3069 3080, 2017 1, 2, 5 ( ) : –。C. Zhang、W. [56] Zeng与L. Liu。UrbanVR：面向上下文感知城市设计的沉浸式分析系统。《计算机与图形学》，99 138，2021年128 5 : –。