通过动态布局调整比较多变量图节点

P. Berger S. Beleites C. Tominski

德国罗斯托克大学视觉与分析计算研究所

arXiv:2303.00528v1 [cs.HC] 1 Mar 2023

摘要

视觉比较是多变量图分析中的一项重要任务。然而，针对数据的不同部分，结合其数据属性对图拓扑特征进行比较仍然颇具挑战，因为没有任何一种单一的可视化表示能够适应比较分析的动态特性。为促进节点—连线图中的视觉比较，我们提出比较透镜，作为一种用于动态布局适配的焦点+上下文方法。其核心思想是从拓扑驱动布局开始，并基于节点属性的多变量相似性，在局部注入属性驱动布局。这有助于在局部层面完成比较任务，同时保留用户对图拓扑的整体心理地图。其他视觉增强措施，包括颜色编码、减少边拥挤和径向引导线，进一步支持比较。为使透镜适应不同的比较情境，可通过用户可控参数对其进行配置。为展示我们方法的实用性，我们将其用于真实世界数据集中足球运动员的比较。

CCS概念

• 以人为中心的计算 → 可视分析；

1. 引言

分析多变量图的难点在于理解图拓扑与图的多变量数据属性之间的关系 [KPW14]。为了发现图拓扑与底层属性值之间的关系，通常需要根据不同的分析目标比较数据的不同部分。例如，可以比较由具有某些给定属性值的节点所诱导的子图的拓扑。反过来，也可以比较某些给定图组件中节点的属性值分布。为了全面理解数据，需要进行多次此类视觉比较。

然而，在多变量图的情境下进行比较颇具挑战，因为这需要可视化表示同时编码图拓扑和多变量属性。在本研究中，我们专注于在基础图可视化形式为节点-链接图时比较节点属性。在节点-链接图中，标准的拓扑驱动布局算法（例如力导向布局）能够呈现图拓扑。此外，还可以通过节点上编码可视化一两个选定的节点属性。 [NMSL19]采用这种标准方法，很难比较节点的多变量属性。原因在于，要比较的节点在布局中可能相距甚远，这使比较变得复杂，而且能够直接比较的可视化属性也非常有限。

另一种做法是使用属性驱动布局，根据属性值设置节点坐标。这样，相似的节点在空间上会彼此靠近，从而更容易进行比较。然而，采用属性驱动布局通常意味着图拓扑的呈现会受到削弱，甚至完全被忽略。此外，当选择不同属性来计算布局时，图布局会发生全局变化。这会使人难以甚至无法建立或维持对整个图的心理地图。因此，无论是采用节点上编码的拓扑驱动布局，还是单独采用属性驱动布局，都不适合用于节点比较任务。

我们的目标是在保持节点链接图整体图拓扑完整的同时，支持对多变量节点进行灵活比较。为此，需要采用某种混合布局，使拓扑特征与多变量属性值能够共存——并非全局共存，而是在动态变化的关注焦点范围内共存。受动态布局调整相关先前研究的启发，我们提出了比较透镜这一轻量级交互式工具，可在节点链接图中引发暂时的布局变化，从而简化比较任务。在透镜内部，节点按照其相对于选定焦点节点的多变量相似性进行布局，使视觉比较变得直接明了。得益于透镜聚焦于上下文的特性，整体的拓扑驱动布局仅在局部发生改变，从而降低认知负荷，也更易于保留整体心理地图。

在简要回顾第2节的相关研究之后，我们将在第3节详细介绍比较透镜的功能、其他视觉增强措施以及用户可控参数。我们将在第4节展示该技术在比较足球运动员网络中的节点时的实用性。本文最后将在第5节简要总结并探讨未来工作的思路。

2. 相关工作

我们的工作与多变量图可视化、视觉比较和可视化动态适配方面的既有研究相关。

多变量图可视化 文献对多变量图的可视化进行了全面讨论 [KPW14、NMSL19]。通常，人们会扩展节点-链接图或矩阵表示等通用图可视化技术，以展示图的多变量属性，例如通过整合附加视图 [KLS*17，NSL19], 添加其他编码 [MB19、BST19], 或根据图的属性进行布局 [SA06、WT08]。

在本文中，我们聚焦于节点-链接图这一常见的图表示形式。文献将节点-链接图中的节点布局分为拓扑驱动布局和属性驱动布局。拓扑驱动布局算法（例如力导向布局） [FR91], 旨在使图拓扑清晰可见。随后，可以通过在图节点上添加其他编码来表示属性 [DS13、vdEvW14、JKS06]。另一方面，属性驱动算法依据节点的属性值进行布局，例如将节点作为群组放置在共享区域中 [SA06、RMFS*11]，置于类似图表的坐标系中 [BCD*10、EGST16], , 或采用多维尺度分析 [DCW11]。如前所述，拓扑驱动布局和属性驱动布局各有优缺点，但比较任务仍然很困难，尤其是在需要结合属性特征来解读图拓扑特征时。

视觉比较 对于一般的视觉比较，Gleicher 等人 [GAW*11] 提出了三种基本方法：并置、叠加和直接编码。叠加是将待比较的元素相互叠放显示，并置则创建并排布局，而直接编码基于直接计算并可视化差异。这些通用方法也被用于支持图的视觉比较，例如通过并置布局 [AWW09] 或叠加边信息 [ABHR*13]。

并置和叠加都有助于执行比较任务。不过，并置的可视化表示可能与用户对图拓扑的心理地图相冲突。对于叠加而言，视觉杂乱可能成为问题，并可能导致数据表示失真。直接编码的优势在于能够直接呈现差异。不过，对差异的可视化可能与图本身的可视化相冲突。鉴于这些不同的优缺点，Tominski 等人 [TFJ12] 建议采用自然交互技术，让用户能够动态创建最适合当前任务的比较布局。本文借鉴这一思路，按需动态适配可视化。

可视化的动态适配动态适配可视化的目标，是在保留总体语境的同时，灵活呈现数据的不同视角 [BBD20，TAA*21，HBS*21]。正如 Elmqvist 等人所提出的，与其在不同视图之间突然切换，不如通过平滑过渡引导用户从一个视角转向另一个视角，使用户保持专注。 [EMJ*11]。

焦点+上下文方法早已被用于对感兴趣区域进行动态调整 [CKB08]。交互式透镜是焦点+上下文技术的一个典型例子。透镜技术被定义为能够对现有基础可视化施加暂时性变化的轻量级工具 [TGK*17]。

在节点链接图中，透镜可以动态调整布局，以创建局部邻域概览 [TAS09] 或通过带入与转移 [MCH*09]支持导航。透镜还可用于显示有关节点属性的更多细节 [JDK10]。类似透镜的技术也被用于支持视觉比较。例如，*CompaRing* 实现了一种带入与比较策略，可按需并置待比较的地理区域 [Tom16]。

受这些前人研究的启发，我们提出了一种透镜技术，可动态适配节点-链接图的布局，以支持多变量图中节点属性的视觉比较。据我们所知，迄今为止，可视化文献中尚未描述过这种用于视觉比较的动态布局适配。

3. 方法

接下来，我们将简要讨论该方法的要求，并介绍比较透镜的基本思想，以促进节点-链接图中的比较任务。除动态布局适配之外，我们还加入了视觉增强功能，以进一步支持比较，并提供参数来根据当前情境调整透镜。

3.1. 要求

基于问题描述和相关工作的回顾，我们确定了该方法的以下要求：

R1 支持视觉比较： 对于现有的节点链接图，应能够根据节点的属性值轻松比较选定的节点。**R2 保持心理地图：** 应通过将全局布局变化减少到必要的最低限度，保持用户对全局图拓扑的心理地图。**R3 平滑显示过渡：** 为使用户保持专注，应优先采用平滑显示过渡，而不是造成干扰的视图切换。

3.2. 方法概述

我们方法的总体思路是在多变量图原本由拓扑驱动的布局中，局部引入属性驱动布局。因此，我们从一个力导向节点链接图入手，在可缩放视图中呈现图拓扑。还可以选择使用节点大小和颜色来可视化特定节点属性。

cb 2023 作者

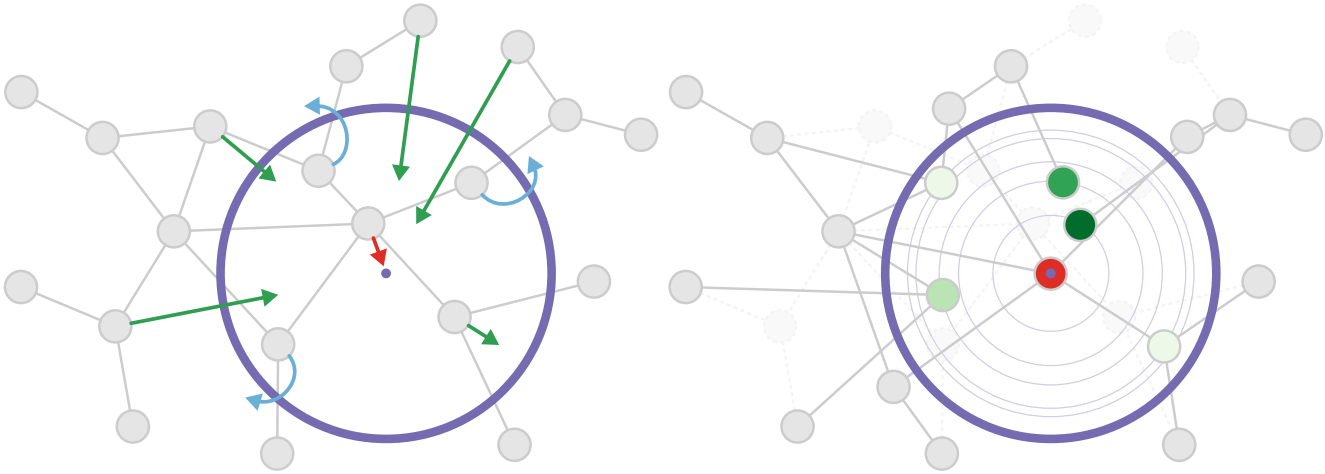


图1：用于比较节点的基于透镜的动态布局适配（左）和视觉增强（右）示意图。左：焦点节点位于中心（红色箭头），满足相似度阈值的节点根据其相对于焦点的相似性进行放置（绿色箭头），而不满足相似度阈值的节点则被移出透镜范围（蓝色箭头）。右：不同深浅的绿色表示基于属性的节点相似性，透镜中嵌入了径向引导线，以进一步支持视觉比较。

为便于按照**R1**的要求，结合图拓扑比较节点及其属性，我们提出一种透镜技术，根据节点属性值对图布局进行局部变换。为满足**R2**，属性驱动的布局变化仅限于透镜内部，从而大体保留拓扑驱动布局。为满足**R3**，与比较任务相关的节点会被吸入透镜，而无关节点则通过平滑过渡被推出透镜。

接下来，我们将具体介绍节点如何放置在透镜中，以及额外的视觉增强和可控的透镜参数如何进一步支持比较。

3.3. 基于透镜的动态布局适配

透镜由一个焦点及其周围的半径定义。当透镜在节点链接图上移动时，距离最近的节点会居中显示在透镜内，并成为焦点节点，如图1中以红色显示。或者，也可以使用光标选择焦点节点，此时透镜会自动定位到该节点上方。

指定焦点节点后，透镜内部会转换为属性驱动布局，以便将焦点节点与其他相关节点进行比较。确定哪些其他节点应被视为相关节点，有多种合理标准可供选择。例如，可以考虑焦点节点的拓扑 k 邻域，或透镜周围特定窗口内的视图邻域。由于我们主要关注节点属性，因此使用焦点节点的“属性邻域”，即根据节点的多变量属性值来考察节点之间的相似性。

为此，计算焦点节点与所有其他节点之间的成对属性相似度。计算方式有多种，例如基于平均欧几里得距离、余弦相似性或皮尔逊相关系数。随后，根据用户可调节的相似度阈值确定哪些节点被视为相关节点。如图 1 中绿色箭头所示，满足该阈值、因而受到用户关注的节点会被重新定位到透镜内部。与焦点节点最相似的节点会被拉近至焦点节点附近。刚好达到相似度阈值的节点则位于透镜边界上。此外，不满足相似度阈值的节点会被移至透镜边缘稍外侧，如图 1 中蓝色箭头所示。将相关节点拉向透镜，并将不相关节点推出透镜，可以看作是此前所述 BringNeighbors 透镜 [TAvS06] 与 MoleView 透镜 [HTE11]的透镜效果的组合。布局自适应通过平滑的基于力的动画实现，使其易于理解。

在由此形成的局部属性驱动布局中，节点到透镜中心的距离表示节点相对于焦点节点的相似性。由于所有被视为与比较相关的节点都位于透镜内部，因此现在可以根据它们到焦点节点以及彼此之间的距离进行比较。通过移动透镜或选择另一个焦点节点（例如，从重新定位的节点中选择），用户可以继续对图进行比较探索。

虽然动态布局适配已经使比较任务变得更加容易，但比较节点之间的距离仍可能需要一定的认知负荷。下面我们将讨论视觉增强，以进一步支持比较。

3.4. 视觉增强

要比较两个节点的相似性，必须比较它们到透镜中心的对应距离。如果要比较的两个节点在透镜中相距较远，这可能会很困难。为了解决这一问题，用户可以选择启用额外的视觉线索

来支持比较。第一种方法是对节点上的相似性值进行颜色编码，如图1右侧所示。

其次，可以在透镜中嵌入同心圆，作为径向引导线，类似于 Moscovich 等人 [MCH*09]提出的方法。用户可以从三种不同模式中进行选择：(i) 固定的等距圆；(ii) 透镜内每个节点对应的固定圆；以及 (iii) 与光标相连、并可选择吸附到节点的动态圆。径向引导线使用户更容易比较节点与中心的距离，如图 1 （右）所示，尤其是靠近透镜边缘的较亮节点。径向引导线的不同模式使用户能够根据具体任务加以运用。动态圆可用于支持探索性分析阶段，而几个固定圆则可用于确认性分析或演示。

最后一项视觉增强针对节点链接图中透镜内常规边造成的视觉杂乱；对于较大或较密集的图，这种情况尤为严重。为消除潜在的边拥挤，我们将透镜与另一种透镜效果结合起来，该效果最初由 Tominski 等人作为 *LocalEdge* 透镜提出 [TAvS06]。如果边没有连接透镜内的节点，这种附加效果会在透镜边缘处截断该边。这实际上意味着，透镜只显示至少有一个端点位于透镜内的边。在某些情况下，要求一条边的两个端点都位于透镜内，甚至可能更有帮助。

所述视觉增强、动态布局适配以及透镜本身，都可以通过用户可控参数进行微调，接下来将对此进行介绍。

3.5. 用户可控的透镜参数

我们的比较透镜是一种交互式工具，因此提供了多种选项，让用户可以控制透镜的外观和功能。最重要的是，用户可以控制焦点节点（这与镜头位置密切相关）、用于相似度计算的属性、相似度阈值、镜头大小，以及径向引导线的模式。

为满足用户不断变化的信息需求，透过直接操控拖动手势调整镜头位置是一项基本功能。移动透镜时，距离镜头中心最近的节点会自动选为焦点节点。用户也可以点击选择焦点节点，此时透镜会自动以新的焦点节点为中心。

为了进一步使透镜适应不同的比较目标，用户可以通过专用的用户界面，交互式地指定在相似度计算中应考虑哪些节点属性。用户既可以选择关注单个属性，也可以选择任意多变量属性组合。更改透镜的属性选择后，系统会针对当前焦点节点重新计算所有成对相似度。计算完成后，透镜内部的节点布局会通过平滑的显示过渡进行更新。

与相似度计算相关的是对相似性阈值的调整。该阈值决定有多少节点会被视为与布局自适应相关，因而受到影响。目前，可以通过用户界面中的滑块设置相似性阈值。对于更直接地调整这一重要参数，也可以考虑采用 Kister 等人提出的镜内控件。 [KRD16]。

最后，用户可以通过直接操作调整透镜大小。这样，便可以在透镜内部焦点区域为基于属性的视觉比较分配的显示空间与透镜外部上下文中图拓扑的保留之间取得平衡。此外，透镜大小决定了用户从透镜内部的属性驱动布局中辨别节点相似性的精确程度。如果比较任务是数据分析的核心，则可以使用更大的透镜以获得更高的精确度。对于简短的比较，较小且精确度较低的透镜可能就足够了。

总而言之，我们的比较透镜是一种新颖的交互式工具，通过动态布局适配和视觉增强，支持在多变量图中即时进行视觉比较。用户可以调整透镜的多个参数。接下来，我们将通过一个真实世界数据集展示比较透镜的实用性。

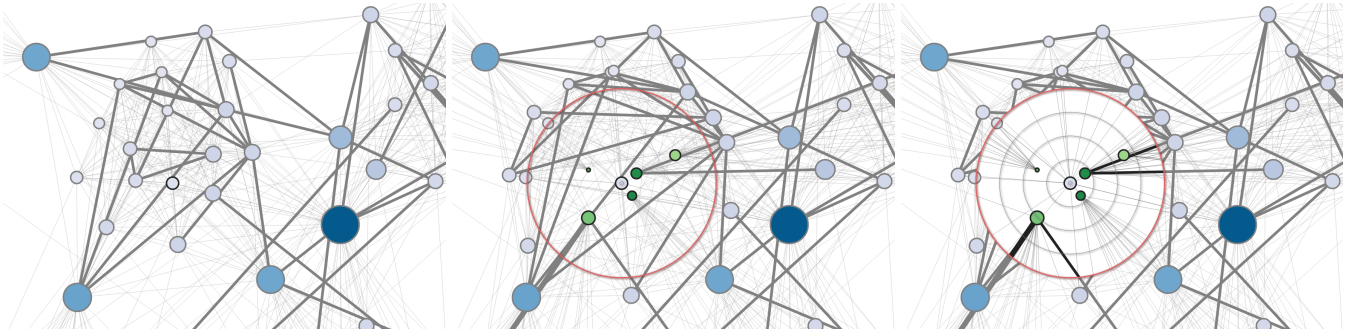
4. 使用案例

作为简要演示，我们使用了一个由欧洲冠军联赛 2017/18 赛季足球运动员构成的多变量图。图中的每个节点代表一名球员，其多变量属性描述了球员的进攻和防守属性（例如出场时间、控球率、射正次数和进球数）。曾效力于同一俱乐部的球员之间存在边。两名球员共同效力过的俱乐部数量由边权重表示。总体而言，该图包含 95 个节点、1046 条边和 39 个定量节点属性。图 2a 中的基本节点链接图展示了图拓扑。节点度通过节点大小和蓝色色阶进行可视化。边权重通过连接线宽度编码。

作为球队经理，比较数据分析的一个目标可能是寻找适合加入我们俱乐部的新球员。在本例中，我们想寻找一名额外的守门员。为此，我们首先选择现任守门员作为焦点节点（图 2a 中带黑色轮廓的浅蓝色节点）。用于相似度计算、需要纳入考量的守门员相关属性设为`keeper_missed` 和 `keeper_save_total`。

随后，我们在图 2b 中激活比较透镜。不满足 50% 相似度阈值的球员会被推到透镜之外。与所选守门员具有足够相似性的球员会被移入透镜，并以不同深浅的绿色显示，以表示它们相对于焦点节点的相似性。可以看到，共有五名守门员被带入透镜。其中两名特别靠近透镜中心，表明其相似性较高。这两名球员可能会成为我们球队感兴趣的守门员人选。

为了更详细地了解这一情况，我们在图中进一步启用视觉增强功能2c。边拥挤程度的降低提高了透镜中相关边的可见性，也使研究相似节点的连通性更加容易。此外，径向引导线有助于更好地解读相似性。因此，我们得出结论：在两名候选者（深绿色节点）中，下面的节点略微更加相似，因此应当首先联系其球员签订新合同。



(a) (b) (c)

图 2：将比较透镜应用于足球运动员图。(a) 展示图拓扑的基本节点-链接图。(b) 激活透镜后，不相关节点被推至透镜之外，而相似的节点（因此也更相关）则根据相似性被放置在透镜内。(c) 通过减少边杂乱并添加径向引导线，增强透镜内的比较效果。

5. 结论

针对多变量图中视觉比较这一具有挑战性的任务，我们提出了比较透镜作为一种新颖的焦点+上下文方法，通过动态布局适配来促进节点链接图中节点的比较。其核心思想是动态创建一种布局，使拓扑特征与多变量属性特征平滑地交织在一起。相应地，透镜内部的节点根据其多变量相似性进行定位，而透镜外部则保留拓扑布局。与造成干扰的视图切换相比，这种方式可以降低比较任务的认知负荷，并更容易保留心理地图。透镜中还加入了额外的视觉增强功能，以进一步支持比较。用户可以通过可控参数根据比较任务调整透镜。

未来，我们计划进一步提升所提方法的实用性。未来工作的一个可能方向是改进透镜内数据属性的呈现方式。目前，节点根据其相似性进行颜色编码。然而，各个属性如何影响相似性并不可见。此时，动态嵌入更多信息或许会有所帮助。例如，可以将简单的点转换为多变量图元，以呈现用于相似度计算的属性。

最后，为了定量评估我们方法的实用性，未来值得开展一项用户研究，对比纯拓扑驱动布局、属性驱动布局和我们的动态透镜驱动混合布局在视觉比较任务中的任务表现。

参考文献

[ABHR*13] ALPER B., BACH B., HENRY RICHE N., ISENBERG T., FEKETE J.-D.：脑连接分析中的加权图比较技术。载于*SIGCHI*人因计算系统会议论文集（*CHI*）（2013），ACM出版社。doi:10.1145/2470654.2470724。2[AWW09] ANDREWS K., WOHLFAHRT M., WURZINGER G.：视觉图比较。载于国际信息可视化会议（*IV*）论文集（2009），IEEE计算机学会。doi:10.1109/IV.2009.108。2

[BBD20] BRÜGGEMANN V ._, BLUDAU M ._-J._, DÖRK M ._：《折叠：重-思考数据可视化中的交互性。 数字人文季刊 *14*，3（2020）。网址：http://www.digitalhumanities.org/dhq/vol/14/3/000487/000487.html。2

[BCD*10] BEZERIANOS A., CHEVALIER F., DRAGICEVIC P., ELMQVIST N., FEKETE J.: GraphDice：一种用于探索多变量社交网络的系统。 计算机图形学论坛 *29*, 3 (2010年)。 doi:10.1111/j.1467-8659.2009.01687.x。 2

[BST19] BERGER P., SCHUMANN H., TOMINSKI C.：《多变量图中结构与属性关系的可视化探索》。载于《国际信息可视化会议（IV）论文集》（2019年），IEEE计算机学会。doi:10.1109/IV.2019.00051. 2[CKB08] COCKBURN A., KARLSON A., BEDERSON B. B.：《综述：概览+细节、缩放与焦点+上下文界面》。ACM计算调查 41, 1 (2008). doi:10.1145/1456650. 1456652. 2[DCW11] DÖRK M., CARPENDALE S., WILLIAMSON C.：EdgeMaps：显式与隐式关系的可视化。载于《可视化与数据分析会议（VDA）论文集》（2011年），SPIE会议论文集第7868卷，SPIE，第78680G页。doi:10.1117/12.872578. 2[DS13] DUNNE C., SHNEIDERMAN B.：图案简化：通过扇形、连接器和团字形提升网络可视化可读性。载于《SIGCHI计算系统人因会议（CHI）论文集》（2013年），ACM出版社。doi:10.1145/ 2470654.2466444. 2[EGST16] EICHNER C., GLADISCH S., SCHUMANN H., TOMINSKI C.：图中节点属性的直接可视化编辑。信息学 3, 4 (2016). doi:10.3390/informatics3040017. 2[EMJ*11] ELMQVIST N., MOERE A. V., JETTER H.-C., CERNEA D., REITERER H., JANKUN-KELLY T.：面向信息可视化的流体交互。信息可视化 10, 4 (2011). doi:10.1177/ 1473871611413180. 2[FR91] FRUCHTERMAN T. M., REINGOLD E. M.：基于力导向布局的图绘制。软件：实践与经验 21, 11 (1991). doi:10.1002/spe.4380211102. 2[GAW*11] GLEICHER M., ALBERS D., WALKER R., JUSUFI I., HANSEN C. D., ROBERTS J. C.：信息可视化中的视觉比较。信息可视化 10, 4 (2011). doi:10.1177/ 1473871611416549. 2[HBS*21] HORAK T., BERGER P., SCHUMANN H., DACHSELT R., TOMINSKI C.：响应式矩阵单元：一种用于探索和编辑多变量图的焦点+上下文方法。IEEE汇刊

可视化与计算机图形学 27, 2 (2021). doi:10.1109/TVCG.2020.3030371. 2[HTE11] HURTER C., TELEA A. C., ERSOY O.：MoleView：面向大型元素图的属性与结构语义透镜。IEEE 可视化与计算机图形学汇刊 17, 12 2011 10 1109 2011 223 3 ( ). doi: . / TVCG. . . [JDK10] JUSUFI I., DINGJIE Y., KERREN A.：《网络透镜：使用视觉过滤交互式探索多变量网络》。载于《国际信息可视化会议（IV）论文集》（2010年），IEEE计算机学会。doi:10.1109/IV.2010.15. 2[JKS06] JUNKER B. H., KLUKAS C., SCHREIBER F.：VANTED：用于生物网络领域高级数据分析与可视化的系统。BMC生物信息学 7, 1 (2006年), 109. doi:10.1186/1471-2105-7-109. 2[KLS*17] KERZNER E., LEX A., SIGULINSKY C., URNESS T., JONES B., MARC R., MEYER M.：Graffinity：大型图中的连通性可视化。计算机图形学论坛 36, 3 (2017年). doi:10.1111/ cgf.13184. 2[KPW14] KERREN A., PURCHASE H. C., WARD M. O.（编）：《多变量网络可视化》（2014年），施普林格《计算机科学讲义》系列第8380卷。doi:10.1007/ 978-3-319-06793-3. 1, 2[KRD16] KISTER U., REIPSCHLÄGER P., DACHSELT R.：MultiLens：通过多功能多点触控透镜实现流畅交互，应用于信息可视化。载于《交互表面与空间国际会议（ISS）论文集》（2016年），ACM出版社。doi:10.1145/2992154.2992168. 4[MB19] MAJOR T., BASOLE R. C.：Graphicle：通过混合可视化方法探索单元、网络与上下文。IEEE 可视化与计算机图形学汇刊 25, 1 (2019年). doi:10.1109/tvcg.2018.2865151. 2[MCH*09] MOSCOVICH T., CHEVALIER F., HENRY N., PIETRIGA E., FEKETE J.-D.：大型网络中的拓扑感知导航。载于《SIGCHI计算系统人因会议（CHI）论文集》（2009年），ACM出版社。doi:10.1145/1518701. 1519056. 2, 4[NMSL19] NOBRE C., MEYER M., STREIT M., LEX A.：《多变量网络可视化研究现状》。计算机图形学论坛 38, 3 (2019年). doi:10.1111/cgf.13728. 1, 2[NSL19] NOBRE C., STREIT M., LEX A.：Juniper：一种用于多变量图可视化的树+表方法。IEEE 可视化与计算机图形学汇刊 25, 1 (2019年). doi:10.1109/tvcg.2018.2865149. 2[RMFS*11] RODRIGUES E. M., MILIC-FRAYLING N., SMITH M., SHNEIDERMAN B., HANSEN D.：用于社区多面分析的盒中群组布局。载于《第三届隐私、安全、风险与信任国际会议暨第三届社会计算国际会议论文集》（2011年），IEEE。doi: 10.1109/PASSAT/SocialCom.2011.139. 2[SA06] SHNEIDERMAN B., ARIS A.：基于语义基底的网络可视化。IEEE 可视化与计算机图形学汇刊 12, 5 (2006年). doi:10.1109/TVCG.2006.166. 2[TAA*21] TOMINSKI C., ANDRIENKO G., ANDRIENKO N., BLEISCH S., FABRIKANT S. I., MAYR E., MIKSCH S., POHL M., SKUPIN A.：通过平滑的显示过渡增强灵活可视分析。视觉信息学 5, 3 (2021年). doi:10.1016/j.visinf.2021.06.004. 2[TAS09] TOMINSKI C., ABELLO J., SCHUMANN H.：CGV——一种交互式图可视化系统。计算机与图形学 33, 6 (2009年). doi:10.1016/j.cag.2009.06.002. 2[TAvS06] TOMINSKI C., ABELLO J., VAN HAM F., SCHUMANN H.：用于图可视化的鱼眼树视图与透镜。载于《国际信息可视化会议（IV）论文集》（2006年），IEEE计算机学会。doi:10.1109/IV.2006.54. 3, 4 [TFJ12] TOMINSKI C.、FORSELL C.、JOHANSSON J.：受自然行为启发的视觉比较交互支持。IEEE 可视化与计算机图形学汇刊 18, 12（2012年）。doi：10.1109/TVCG.2012.237。2[TGK*17] TOMINSKI C.、GLADISCH S.、KISTER U.、DACHSELT R.、SCHUMANN H.：可视化交互式透镜：扩展综述。计算机图形学论坛 36，6 （ 2017 年）。doi:10.1111/cgf.12871。2[Tom16] TOMINSKI C.：CompaRing：降低视觉比较成本。载于欧洲图形学可视化会议（EuroVis）短文论文集（荷兰格罗宁根，2016年），欧洲图形学协会。doi:10.2312/eurovisshort.20161175。2[vdEvW14] VAN DEN ELZEN S.、VAN WIJK J. J.：多变量网络探索与呈现：通过选择与聚合从细节到概览。IEEE 可视化与计算机图形学汇刊 20, 12（2014年）。doi:10.1109/tvcg.2014.2346441。2[WT08] WU Y.、TAKATSUKA M.：多变量网络可视化：混合方法。载于 IEEE PacificVis 会议论文集（PacificVis）（2008年），IEEE计算机学会。doi：10.1109/pacificvis.2008.4475480。2

cb 2023 作者