

1-8-2019

A 3D Tree Visualization of Network Data Based on WebVR

Lin Ding

Fuzhou University, Spatial Information Research Center of Fujian, Key Laboratory of Spatial Data Mining & Information Sharing of MOE, Fuzhou 350116, China;

Guoxin Huang

Fuzhou University, Spatial Information Research Center of Fujian, Key Laboratory of Spatial Data Mining & Information Sharing of MOE, Fuzhou 350116, China;

Xu Ying

Fuzhou University, Spatial Information Research Center of Fujian, Key Laboratory of Spatial Data Mining & Information Sharing of MOE, Fuzhou 350116, China;

Follow this and additional works at: <https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal>



Part of the Artificial Intelligence and Robotics Commons, Computer Engineering Commons, Numerical Analysis and Scientific Computing Commons, Operations Research, Systems Engineering and Industrial Engineering Commons, and the Systems Science Commons

This Paper is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation.

A 3D Tree Visualization of Network Data Based on WebVR

Abstract

Abstract: A new method of three dimensional tree-style visualization of network data is proposed in this paper based on cluster computing, which maps the network structure of clustered data to hierarchical tree structure. *The number of nodes of a community is treated as the weight to improve the PhylloTrees' phyllotactic layout algorithm and the 3D visualization of network data is implemented based on WebVR. Friendly interactive manipulations are achieved in the immersive VR scene such as rotation, zooming, pan, picking, and transparent fade / highlight enhancement of different displaying.* The experimental results show that *our method can show not only the overall hierarchical structure of network, but also the detail information of its vertices simply and flexibly.* Thus, *we can gain diverse, different-aspect, multi-view, multi-scale profile of network data,* and provide an effective technical mean to explore the potential value of network by virtual reality technology.

Keywords

WebVR, network community structure, 3D visualization, Neo4j

Recommended Citation

Lin Ding, Huang Guoxin, Xu Ying. A 3D Tree Visualization of Network Data Based on WebVR[J]. Journal of System Simulation, 2018, 30(7): 2736-2743.

一种基于 WebVR 的网络数据三维树形可视化

林定, 黄国新, 徐颖

(福州大学, 福建省空间信息工程研究中心, 空间数据挖掘与信息共享教育部重点实验室, 福建 福州 350116)

摘要: 提出一种基于聚类的网络数据三维树形可视化方法, 将聚类所得网络结构映射为层次划分树型结构, 用社区节点的数量作为权重, 改进 *PhylloTrees* 的叶序布局算法, 实现了基于 WebVR 的网络数据三维可视化。在三维场景中实现旋转、缩放、移动、拾取、透明淡化/高亮增强的差异化显示等交互操作, 示例实验结果表明, 本文的方法不仅能够简洁灵活地展示网络数据的总体层次结构, 还能够多样化、差异化、多尺度地表达数据细节, 为利用虚拟现实技术探索网络数据的潜在价值提供有效的技术手段。

关键词: WebVR; 网络社区结构; 三维可视化; Neo4j

中图分类号: TP391.9

文献标识码: A

文章编号: 1004-731X (2018) 07-2736-09

DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.201807038

A 3D Tree Visualization of Network Data Based on WebVR

Lin Ding, Huang Guoxin, Xu Ying

(Fuzhou University, Spatial Information Research Center of Fujian, Key Laboratory of Spatial Data Mining & Information Sharing of MOE, Fuzhou 350116, China)

Abstract: A new method of three dimensional tree-style visualization of network data is proposed in this paper based on cluster computing, which maps the network structure of clustered data to hierarchical tree structure. The number of nodes of a community is treated as the weight to improve the *PhylloTrees'* phyllotactic layout algorithm and the 3D visualization of network data is implemented based on WebVR. Friendly interactive manipulations are achieved in the immersive VR scene such as rotation, zooming, pan, picking, and transparent fade / highlight enhancement of different displaying. The experimental results show that our method can show not only the overall hierarchical structure of network, but also the detail information of its vertices simply and flexibly. Thus, we can gain diverse, different-aspect, multi-view, multi-scale profile of network data, and provide an effective technical mean to explore the potential value of network by virtual reality technology.

Keywords: WebVR; network community structure; 3D visualization; Neo4j

引言

现实的网络通常包含数千、数百万甚至数亿的

节点, 以及节点之间错综复杂的连接关系, 这类网络通常具有一个共同性质, 即社区结构, 社区结构反映了节点之间关系的局部聚集特征。社区一般由性质相似或功能相近的网络节点组成, 相当于网络系统中的一个功能单元。复杂网络研究的核心内容之一是揭示网络的功能和结构之间的内在联系, 网络可视化技术将网络数据以图形化方式展示出来,



收稿日期: 2017-07-30 修回日期: 2017-12-01;
基金项目: 国家自然科学基金(31200430);
作者简介: 林定(1977-), 女, 福建闽侯, 博士, 助理, 研究方向为虚拟地理环境、三维数据可视化;
黄国新(1993-), 湖北丹江口, 硕士生, 研究方向为虚拟地理环境。

<http://www.china-simulation.com>

• 2736 •

快速直观地解释和概览网络数据, 成为人们研究复杂网络的内部结构, 揭示社区结构和网络功能之间的关系, 挖掘隐藏在网络内部的有价值信息的重要技术。长期以来, 受视觉显示硬件技术发展的约束, 信息可视化方法大多是针对二维显示屏幕而设计的。随着计算机技术和虚拟现实技术(VR)的发展, 三维信息可视化技术以自然贴合的方式利用人类视觉感知系统, 通过视觉维度上的拓展, 使人们更容易地从生成的图形中发现复杂数据下的规律和功能结构特点, 更快捷地获得最大的信息量, 大大提升对复杂关系的认知效率^[1]。在信息爆炸的当下, 信息容量和复杂度远远超过人类所能够掌控的范围, 基于 VR 的数据可视化技术提供了与人类感知通道一致的交互手段(感知和反馈), 增加了对数据的临场感, 使人们更容易在宏观上把握信息的内涵, 更好地实现对数据的语义分析以及对大数据意义的理解^[2]。因此, 基于 VR 的网络数据三维可视化技术充分利用人类的理解力和洞察力以及计算机的数据处理和分析能力, 以符合人类感知特征的方式提供沉浸式体验, 按用户需求推动对数据的分析和语义提取, 根据用户意愿探索图形, 是高效分析复杂网络数据、揭示网络功能与结构的内在联系、挖掘网络内部隐藏价值的关键技术^[3], 必将成为大数据时代的新工具之一。

1 相关工作

网络可视化的目的是绘制出符合一定美学标准且有助于人们直观高效地分析、挖掘网络数据的图形, 其研发流程大致包含 4 个步骤: (1) 获取数据并分析网络的结构; (2) 根据一定准则将所有不感兴趣的数据过滤掉; (3) 对感兴趣的数据, 采用可视化算法和模型来描绘; (4) 设计并实现交互式用户终端界面, 提供数据的个性化展示和探索式体验。网络可视化的关键在于如何从海量数据中选择性地表达网络的节点、边以及上下文信息等要素, 生成合理空间布局的图形, 直观高效地展示网络的宏观结构特征和信息流细节, 辅助人们理解、揭示

网络的内在规律。由于网络数据的高度复杂性, 网络结构的发现和网络数据可视化的每个流程都面临极大的挑战。现有的网络可视化方法主要有基于力导向的方法、基于地图的方法、基于圆形布局的方法、基于聚类的方法等, 其中大多数方法局限于二维平面, 部分方法可扩展到三维空间。

Richard Brath^[4]整理了近 25 年来数据与信息在三维可视化方面的进展, 指出三维可视化具有如下积极意义: 三维布局能够利用额外的维度表示数据的位置和特征信息, 三维空间格局有助于人们形成有效的认知和推理能力; 作者将三维可视化方法划分为: 直接映射, 球体映射和树形映射, 其中网络数据的三维可视化又可细分为 3 类: (1) 二维视图的三维增强, 如三维场景中的立体柱形图; (2) 二维布局的三维拓展, 如以节点-连接布局扩展而成的圆锥树以及树图的三维空间拓展等; (3) 真三维结构布局, 如生物信息学中三维空间里的神经网络等。

直接映射将数据的网络结构或层次结构直接绘制在三维空间中, 例如, Cone tree^[5]是最具代表性的层次数据的三维可视化应用, 将根节点布局在圆锥体的顶点位置, 其子节点依次顺延扩展, 同层次的节点, 位于同一高度, 锥体的底面积随层次增加而逐渐减少; 通过旋转操作多角度地展示数据, 利用阴影信息表达数据的聚类结果, 支持兴趣节点的检索和高亮显示, 同时在交互过程中添加动画轨迹帮助用户理解整体结构。但系统仅仅支持层次数据(非网络数据)的可视化, 不能提供三维空间布局的交互式调整。直接映射往往无法将大规模的网络数据有效地表达于紧凑的三维空间内。

球体映射利用球面和球内的三维可视布局可提高空间的利用效率。相对于平面图形而言, 球体在表达数据相关性上更具优势, 即, 相关则邻近, 无关则对立。SphereTree^[6]将树图扩展为球面填充, 通过在缓慢旋转的球体上添加标签信息增强数据的辨识度, 并提供数据查询功能。Strata map^[7]以平面 Voronoi 布局为基础扩展到三维空间, 将不同层

次的数据在球体表面分级拉伸,完整地无失真地表达了数据的层次结构。Hughes 等^[8]利用三维双曲空间映射扩展了可表达的数据规模,采用 H3 算法^[9]将生物种系图布局到球体内部,通过轨迹球交互的方式查看完整的物种分类,所展示的物种分类球可支持十万级规模的数据表达。然而,关于球体映射的 VR 三维可视化技术,现有文献尚未提出有效的解决方法。如何解决球体背面数据的被遮挡问题以及如何布局(既能有效利用球体内部的三维空间又能直观展示数据的内在结构)等问题,都存在较大技术困难。

树形映射利用树木自身清晰的层次结构帮助用户把握数据的宏观结构,层次化视觉效果更强。Kleiberg 等^[10]将大规模层次数据映射为三维自然树木,利用简化的 Holton 导管模型^[11]将抽象数据转换为几何模型,每条链路对应一个分支,根据文件属性确定其分枝半径、长度和分枝角,直至所有分支汇聚到根部形成树型结构;为了改善叶节点数据映射为面状树叶几何而造成的视图杂乱,以及枝条狭长、拥挤等问题,利用 phiballs 模型^[12]将树叶映射改变为果实映射,通过果实的锥形突起的个数表达子文件的数量,果实大小表达文件的大小差异;然而,该文献并没有针对遮挡问题给出明确的解决方案。Chlan^[13]提出网络数据层次聚类结果的概览方法——三维树木形状,同时,聚类细节的表达则利用圆环状年轮的平面填充展示嵌套子树的聚类方式。Neumann^[14]从大数据可视化的三维空间布局角度出发,利用简化的植物学叶序算法将节点映射为不规则、自组织的植物叶片,通过叶序角和布局方向角的变化表达不同结构的数据,在有限的空间内展示多层次的数据,便于数据的增删操作和非均衡结构的数据表达,该方法没有涉及三维空间布局优化,直观快捷。

在三维空间中实现兼顾美学标准的紧凑空间布局算法属于 NP 难度问题,现有的网络数据三维可视化方法主要有基于力导向的方法(空间形态随机)、基于三维树形的方法和基于球体的方法;大

部分网络可视化应用都在视觉效果和计算效率之间折衷而综合使用多种节点布局方法。因此,网络数据的三维可视化技术,即,如何对网络的节点、边以及上下文信息等要素,以美观的空间布局,有选择性地、直观高效地展示网络的宏观结构和信息流的共性特征与细节,并消除视觉空间遮挡,是人们探索数据的内在关系,开展蕴涵于数据的语义分析以及对大数据意义的理解的关键技术之一,目前仍处于初步发展阶段。

本文集成了开源图数据库 Neo4j 和图形库 ThreeJS,实现了基于 WebVR 的网络数据三维树形可视化原型,用户按需交互地选用社区发现算法对网络数据进行聚类,采用与 PhylloTrees^[14]类似的叶序结构将聚类结果快速映射为三维树木形态,借助 Oculus 手柄对 VR 场景中数据进行简洁灵活的交互操作,沉浸式地展示网络的结构、组织层次和局部细节,探索数据的潜在信息。

2 基于 web VR 的网络数据三维树形可视化原型

2.1 可视化原型的总体架构

集成开源图数据库 Neo4j 和图形库 ThreeJS,开发环境为普通 PC 机(CPU-i7/8G/WebGL1.0),采用浏览器-服务器(B/S)模式实现系统框架。浏览器端通过 HTTP 请求访问服务器,服务器根据请求运行网络数据聚类算法并返回聚类结果;浏览器端接收聚类结果并将其映射为层次结构数据,然后采用 WebGL+HTML5+JavaScript 技术实时渲染网络数据;涉及对网络数据的修改、更换和重新聚类的交互操作需要请求服务器协助完成,其他不改变数据的用户交互操作均在浏览器端完成,可视化的总体框架如图 1 所示。

2.2 网络聚类结果到三维树木的映射

采用螺旋扩散的叶序模式,将网络数据的聚类结果映射为三维树木,网络节点映射为树叶,整个网络或子网络(社区)映射为树根或子树根,网络的

划分(或社区数量)映射为根节点的孩子数量, 即分支数量; 对网络的层次划分, 如, 大类内部嵌套多个小类, 映射为树节点的双亲与孩子的链接关系。

于是, 整个网络的三维树形可视化过程如图 2 所示, 树叶代表网络中的实体节点, 树枝代表子网络或社区, 树高代表对网络划分的最大深度。

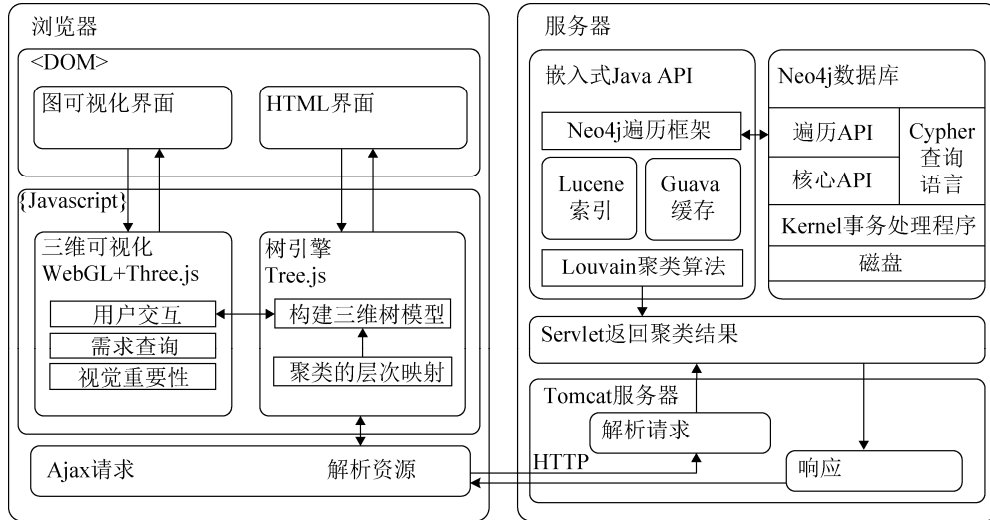


图 1 网络数据可视化的总体框架
Fig. 1 Overall framework for network data visualization

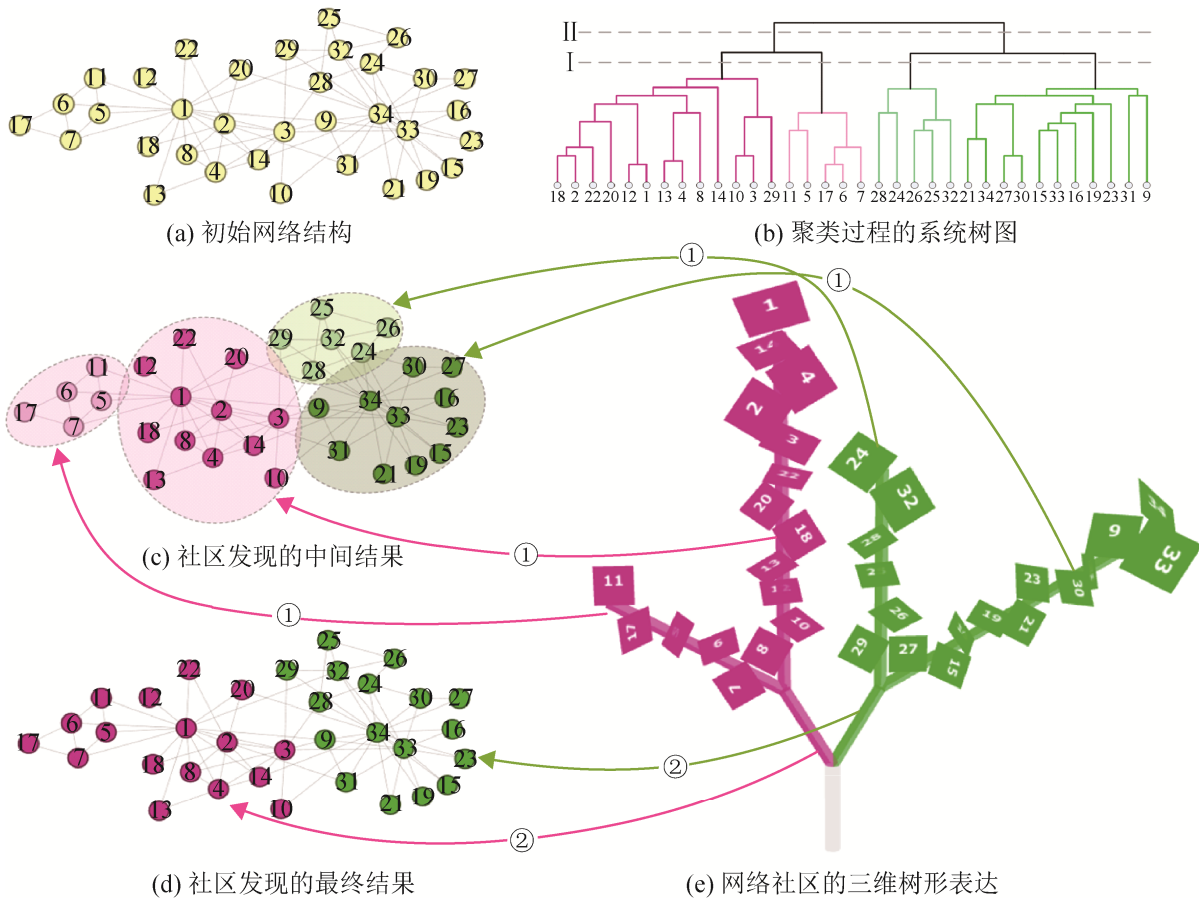


图 2 网络数据的 3D 树形可视化过程(空手道俱乐部网络数据为例)
Fig. 2 3D tree visualization of network data (demo of Karate club data)

网络数据的宏观结构由树木分支结构的空间布局决定,包括枝条的空间布局和叶的空间布局。枝条和树叶的视觉参数有分枝角、长度、半径、颜色等,其中,分枝角对树木的三维空间格局影响最大。如图3所示,分枝角由着枝角 μ 和方位角 φ 共同决定,最后通过枝条长度 r 确定枝条的空间位置。其中,方位角 φ 由斐波那契数列计算,本文选取 137.5° 。

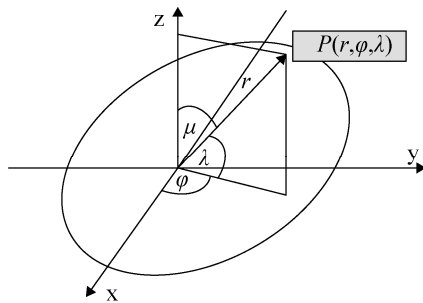
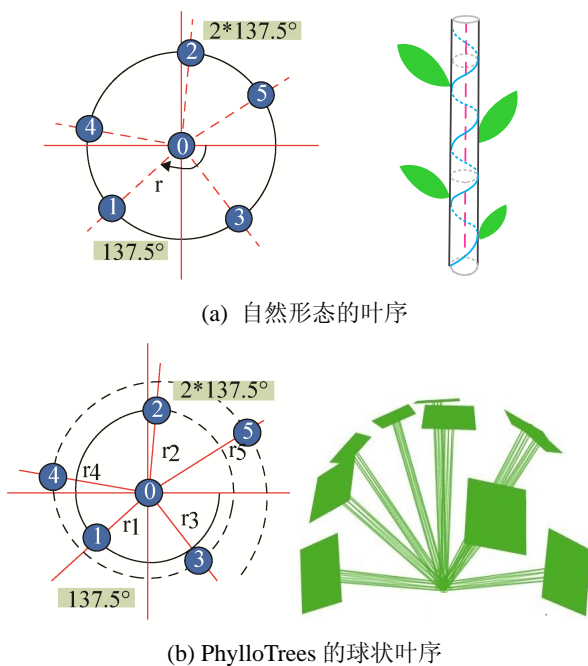


图3 叶序模式的参数
Fig. 3 Parameters of phyllotaxy

本文改进了Neumann^[14]的PhylloTrees叶序角算法,分别对着枝角 μ 和枝条长度 r 应用不同的映射模型得到自然形态的叶序模式和球状叶序模式,其计算原理如图4所示。



(a) 自然形态的叶序
(b) PhylloTrees 的球状叶序
图4 叶序的三维空间布局
Fig. 4 3D layout of phyllotaxy

在球状叶序模式下,根据树结点所对应社区的累计节点容量计算螺旋状叶序分布中叶结点距离参考中心的距离 r ,如公式(1):

$$r = c * \sqrt{\sum_1^i C_i} \quad (1)$$

式中: c 是固定常量,用于调整枝条长度; C_i 表示社区 i 内的节点数量;由整个网络的节点总数可计算得到 r_{\max} 。

利用结点距离半径 r 确定对应的着枝角 μ ,如公式(2):

$$\mu_i = (r_i / r_{\max}) * \mu_{\max} \quad (2)$$

式中: μ_i 表示第 i 个枝条的着枝角,本文的 μ_{\max} 选取 90° ,即数据分布于半球空间。

自然形态叶序模式的参数计算与球状叶序类似,只是此时 r 取固定值,并将公式(1)应用于图3中 z 值的计算。

根据自然树木的叶序模式,直接将网络中的叶节点映射为树叶必然引起视图杂乱,部分枝条的狭长拥挤等问题,不利于数据的有效表达。然而,纵观现有文献,尚无解决三维空间遮挡问题的高效方法,现有解决方案大多是通过用户交互和某种特定方式的空间利用改善信息的表达效率,缓解可视化中存在的歧义信息。如何根据用户的关注区域或查询条件对视图中的对象进行聚焦,忽略无用信息,锁定关键信息,直接快速地定位到感兴趣区域,是可视化软件的关键功能。本文为了避免密集叶节点之间的相互遮挡,在植物学叶序算法基础上,利用特定开度的螺旋式绕枝生长确定叶的着枝点,即通过斐波那契螺旋构造叶序角。构造叶序的原理如图4(a)所示。整个叶序建模过程可描述为沿着与枝条表面相切的方向不断放置叶器官的过程:即,由母线绕中心轴旋转得到表面近似模型,沿表面相切方向,从叶的起始生长位置开始向叶的终止生长位置执行以下操作:

- 1) 以特定叶开度为间隔(如 137.5°),不断重复地将叶放置到枝条表面,使之与表面曲面相切,直到发生冲突;
- 2) 当发生冲突时,判断待放置点是否到达枝

条表面的叶的终止生长位置; 如果是, 转 4), 否则, 转 3);

3) 沿着枝条表面曲线, 将待放置点向叶的终止生长位置移动, 移动距离的基本单位由叶的数量对枝条长度的均匀划分; 然后转 1) 继续执行;

4) 结束。

2.3 数据的查询、导航与交互操作

数据查询: 利用 HTTP+Ajax+Servlet 技术实现, 用户在浏览器端输入查询节点的 ID, 利用 Ajax 传递数据参数, Servlet 解析传递的信息后, 直接访问嵌入式的本地数据库, 筛选符合检索条件的结果集合, 通过 JSON 文件返回前端, 用于查询结果的实时绘制。

数据导航: 对于查询结果的绘制, 为了增强视觉效果, 研发数据导航功能。引入 Tween.js 的补间动画技术, 利用三维模型的缓动与延迟, 解决三维视图中的数据导航过程容易丢失视觉焦点信息的问题。设计并实现缓动函数控制物体在某个时间段内的运动速度及运动效果, 研发实现的数据导航模块能够根据用户对数据的关注区域或查询条件对视图中的对象进行焦点变换, 锁定关键信息, 忽略无用信息, 直接快速地从杂乱的数据中定位到感兴趣区域, 如图 5(d)和图 6(a)所示。

节点邻接关系的可视表达: 在二维可视化技术的边捆绑算法^[15-18]的启发下, 提出一种新的在三维树形几何中展示网络邻接关系的表达方法。客户端根据树形拓扑结构追溯所有邻接节点的最近公共祖先, 沿着枝条路径实时绘制节点的邻接关系细节, 并对其他无关节点进行透明淡化处理, 在展示网络节点之间关系的细节特征的同时避免了直线绘制邻近关系所引起的视图杂乱, 如图 6(b)和(c)所示。在邻接关系的绘制过程中, 如果节点与其邻居节点属于同一社区, 节点之间的连线通过枝条的向量方向直接相连; 如果节点与其邻居节点存在跨社区的关系, 则通过两个节点的最近公共祖先作为中间承接点, 分别依枝条走向绘制节点到公共祖先

的连接线, 以此展示网络节点的邻接细节特征。

拾取: 为了增强选中目标的视觉辨识度, 本文研发实现了透明淡化/高亮增强的差异化数据显示方法。在用户拾取操作过程中, 实时改变模型的材料信息, 高亮突显用户拾取选中的当前对象, 同时对非选中对象进行透明淡化处理; 通过淡化拾取对象的上下文信息, 突出选中的关键要素。如图 5(c), (d)和图 6(b)。借助拾取功能, 在展示网络宏观结构的基础上, 叠加表达选中对象的细节信息; 即, 用户头戴 Oculus Rift 显示器, 利用 Oculus 手柄选取场景中的数据节点(树叶或枝条), 采用射线求交测试, 将所有相交对象保存到拾取数组中, 返回距离视点最近的对象的 ID; 然后执行“数据查询”, (1) 若查询树叶, 则将节点的数据细节绘制于叶片上; (2) 若查询枝条, 则将枝条所对应社区的共同属性信息绘制于枝条上。

调整局部显示细节的交互操作: 在三维场景中, 用户可以对树木的局部视觉细节进行任意的编辑与调整, 如图 6(a)所示, 包括: (1) 局部模型的旋转, 改变选中枝条和叶的着生角及朝向等; (2) 局部模型的缩放, 改变选中枝条或叶的大小。进行局部视觉细节的调整, 可以改善空间遮挡问题引起的信息损失, 实现多样化的视觉展示效果。

多尺度数据展示: 在三维场景中, 可以根据用户的历史行为建立用户视图描述向量, 在三维树木上构建各个分支的用户视觉特征, 通过求解视觉重要性的目标函数自动地对分支上的数据执行用户意图过滤操作, 叠加实现网络数据的多尺度展示。

2.4 案例数据的三维树形展示

实验用的示例数据为空手道俱乐部(Zachary's Karate Club)网络数据^[19], 包括 34 个节点, 78 条边, 其中节点代表俱乐部成员, 边代表成员之间存在交流关系。对示例数据采用文献[20]的方法, 选用 Louvain 层次聚类算法进行网络划分并映射为三维树木。三维树木模型的拓扑结构通过层级关系进行显式定义, 树模型的枝条层次由聚类层级决定, 其

中主干为第0级，包含所有社区和叶子节点；生长
在主干上的是二级枝条，代表聚类完成后的最终社
区结构；生长在第1级枝条上的子节点为第2级，
如二级枝条，其中2~N级枝条均代表聚类过程
中的中间社区结构，依此类推，最后一级是叶子，叶
与初始网络结构中的所有数据节点一一对应。

在三维场景中，树木的枝条代表社区，分支结
构决定了数据在三维空间中的布局。具体地，枝条
的视觉参数有分支角度、枝条长度、枝条半径等，
其中，枝条的分支角度对树木的三维空间分布格局

影响最大，本文根据社区的重要性或社区自身在图
中所占比例预设一个权值计算函数，通过权值来
说明社区类别的重要性将更加准确和贴近现实，整
个可视化过程如图2所示。在WebVR场景中进行
交互式查询、拾取、局部视图操作的展示结果如图
5~6所示。

实验结果表明，本文的方法不仅能够简洁灵活
地展示网络数据的总体层次结构，还能够通过三维
场景中的旋转、缩放、移动、拾取等交互操作，多
视角、多尺度、差异化地展示数据的细节信息。

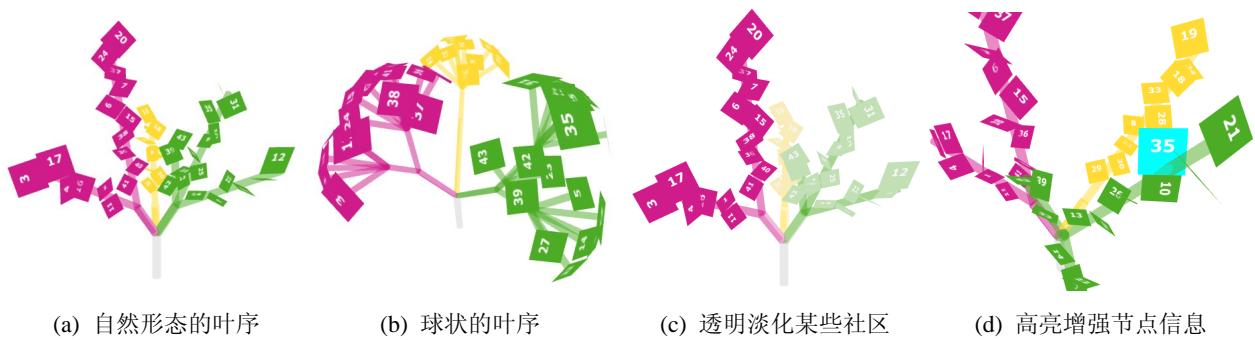


图5 叶序三维布局与差异性显示
Fig. 5 Phyllotaxis 3D layout and differential display

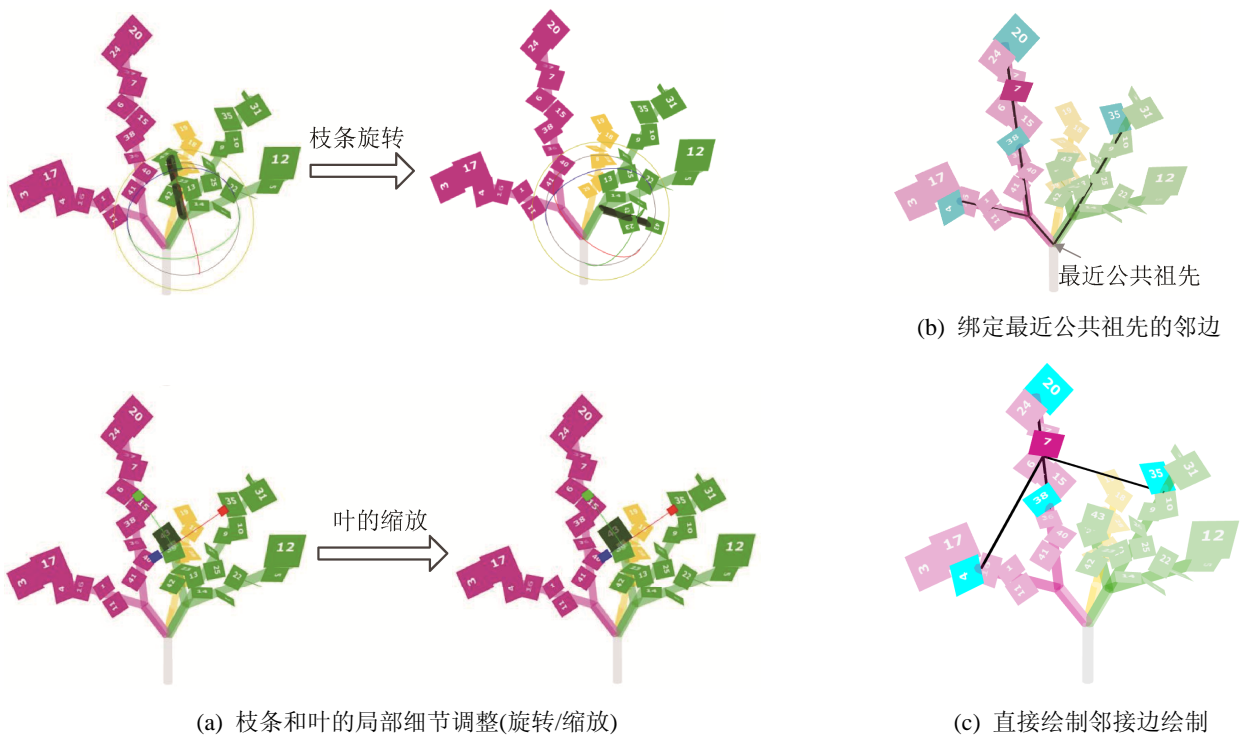


图6 WebVR下的交互操作及其效果
Fig. 6 Interaction demo and its effects in WebVR

3 结论

本文提出了一种基于聚类的网络数据三维可视化方法, 集成开源图数据库 Neo4j 和图形库 ThreeJS 实现了 WebVR 平台上的网络数据三维树形可视化; 既简洁灵活地展示网络数据的总体层次结构, 又能多视角、多尺度、差异化地展示数据细节; 为探索和挖掘网络数据中隐藏的内在关系和价值提供有效的技术手段。

然而, 本文的可视化方法也存在诸多不足, 目前, 尚未考虑网络数据的动态演化, 尚未集成现有的优秀的二维可视化算法, 尚未完成网络数据的二三维一体化联动展示, 尚未集成优秀的统计分析工具对网络数据进行定量化精确分析, 后续研究将逐渐完善。

参考文献:

- [1] Ware C, Mitchell P. Visualizing Graphs in Three Dimensions [J]. ACM Transactions on Applied Perception (S1544-3558), 2008, 5(1): 1-15
- [2] 陈宝权, 秦学英. 混合现实中的虚实融合与人机智能交融[J]. 中国科学: 信息科学, 2016, 46(12): 1737-1747. doi: 10.1360/N112016-00249.
Chen Baoquan, Qin Xueying. The Actual Situation Integration And Human Intelligence Blend of Mixed Reality[J]. Scientia Sinica (Informationis) 2016, 46(12): 1737-1747. doi: 10.1360/N112016-00249.
- [3] Teyseyre A R, Campo M R. An Overview of 3D Software Visualization [J]. IEEE Transactions on Visualization & Computer Graphics (S1077-2626), 2009, 15(1): 87-105.
- [4] Brath R. 3D InfoVis Is Here to Stay: Deal with It [C]// 3DVis 2014 IEEE VIS International Workshop on 3DVis. Paris France: IEEE, 2014: 25-31.
- [5] Robertson G G, Mackinlay J D, Card S K. Cone Trees: Animated 3D Visualizations of Hierarchical Information [C]//Proceedings of the ACM Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI '91). LA. NY: ACM, 1991: 189-194.
- [6] Brath R, Macmurchy P. Sphere-based Information Visualization: Challenges and Benefits [C]//16th International Conference on Information Visualisation. France: IEEE, 2012: 1-6.
- [7] Choi J, Kwon O, Lee K, et al. Strata Treemaps [C]// International Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques, SIGGRAPH 2011. British Columbia Canada: ACM, 2011: 87.
- [8] Hughes T, Hyun Y, Liberles D A, et al. Visualising Very Large Phylogenetic Trees in Three Dimensional Hyperbolic Space [J]. BMC Bioinformatics (S1471-2105), 2004, 5(1): 5-48.
- [9] Munzner T. H3: Laying Out Large Directed Graphs in 3D Hyperbolic Space [C]//Proceedings of the 1997 IEEE Symposium on Information Visualization. Phoenix, AZ: IEEE, 1997: 2-10.
- [10] Kleiberg, E De Wetering, H V Wijk, et al. Botanical Visualization of Huge Hierarchies[C]// Proceedings of the IEEE Symposium on Information Visualization 2001 (INFOVIS'01). Washington DC USA: IEEE Computer Society, 2001: 87-94.
- [11] Holton M. Strands, Gravity and Botanical Tree Imagery [J]. Computer Graphics Forum (S1467-8659), 1994, 13(1): 57-67.
- [12] Lintermann B, Deussen O. Interactive Modeling of Plants[J]. IEEE Computer Graphics and Applications (S0272-1716), 1999, 19(1): 56-65.
- [13] Chlan E B, Rheingans P A. Botanically Inspired High-dimensional Visualization with Multivariate Glyphs [C]//Proceedings of the Sixth Joint Eurographics-IEEE TCVG Conference on Visualization. AirelaVille Switzerland: Eurographics Association Eurographics Association, 2004: 231-236.
- [14] Neumann P, Carpendale S, Agarawala A. PhylloTrees: Phyllotactic Patterns for Tree Layout[C]//EUROVIS'06 Proceedings of Eurographics. AirelaVille, Switzerland: Eurographics Association, 2006: 59-66.
- [15] Brendel R, Heyde M, Brunst H, et al. Edge Bundling for Visualizing Communication Behavior[C]// Proceedings of the 2016 Third Workshop on Visual Performance Analysis (VPA 2016). Utah USA: IEEE, 2017: 1-8.
- [16] Toeda N, Nakazawa R, Itoh T, et al. On Edge Bundling and Node Layout for Mutually Connected Directed Graphs[C]//Information Visualisation. IEEE, 2016: 94-99.
- [17] Zielasko D, Weyers B, Hentschel B, et al. Interactive 3D Force-Directed Edge Bundling [J]. Computer Graphics Forum (S1467-8659), 2016, 35(3): 51-60.

(下转第 2752 页)

<http://www.china-simulation.com>

• 2743 •