

# 树图可视化

张昕, 袁晓如\*

(北京大学信息科学技术学院,机器感知与智能教育部重点实验室 北京 100871)

(xiaoru.yuan@pku.edu.cn)

**摘要:** 树图是一种流行的利用包含关系表达层次化数据的可视化方法。由于其呈现数据时高效的空间利用率和良好的交互性,受到众多的关注,得到深入的研究,并在科学、社会学、工程、商业等领域都得到了广泛的应用。文中从树图的布局算法、交互方法、改进和变种、应用领域和用户评价研究等角度,对树图可视化及其扩展方法的基础和研究前沿进行了综述,并对树图可视化方法的前景进行了展望。

**关键词:** 树图; 信息可视化; 层次数据可视化; 树图布局算法; 人机交互界面

**中图法分类号:** TP391

## Treemap Visualization

Zhang Xin and Yuan Xiaoru\*

(School of Electronics Engineering and Computer Science, Key Laboratory of Machine Perception (Ministry of Education), Peking University, Beijing 100871)

**Abstract:** Treemaps are popular visualization methods for hierarchical data with visually encoding the hierarchical property by containment. Because of their space efficiency and interactivity, Treemaps have been deeply investigated and many variations have emerged. The techniques have also been widely applied in many areas, including scientific, engineering, social, educational and commercial fields. In this survey, we summarize both basic and state-of-the-art researches on Treemaps, including layout algorithms, interaction methods, extensions and variations, applications and user evaluations. Discussion on the future research direction of Treemaps is also presented in this paper.

**Key words:** treemap; information visualization; hierarchical data visualization; treemap layout algorithm; human-computer interaction interface

信息可视化是 20 世纪末期随计算机图形学、人机交互、视觉设计、心理学等领域发展而逐渐兴起的一门交叉学科,是研究大规模非数值型信息的视觉呈现方法和技术。树图(treemap)是早期信息可视化研究的代表工作之一,最早由 Johnson 等<sup>[1]</sup>在 1991 年提出。由于在表现层次化数据上的有效性,树图自诞生起就受到了广泛的欢迎,它在 20 多年的发展中,获得了深入的研究,已经从最初简单的形式发展为具有良好实用性的可视化方法,并得到了广泛的应用。

层次化数据是生活、科研中的常见数据类型,也是对真实世界的一种抽象。生物世界中,纷繁的物种被划分到门纲目科属种的层级;社会机构中的层级化管理;电脑中,文件组织在父子目录的结构中等。通过将信息组织成粒度不同的层次,人们能够更好地掌握信息、理解知识、分配资源。层次化数据的可视化,就是专门适用于呈现具有层级结构的数据的可视化技术,尤其强调对其中层次和包含关系的呈现;采用不同的视觉符号来表现这种层次关系决定

了层次化数据可视化的主要不同类别。

节点链接图是表现层次化数据的一类代表方法<sup>[2]</sup>。它采用二维或三维空间中的点、球或其他形式的节点来代表数据中的个体，用节点之间相连的线段或曲线段来代表个体之间的关系。节点链接图可用来表现任意图结构，但当用来表现层次化数据时，就退化为树形结构。它能够较清晰地呈现出节点间的层次关系，但由于点线间的空白浪费了大量屏幕空间，因而当数据量增加时，呈现效果很快变差到难以令人接受。Zhao 等<sup>[3]</sup>称其为结构清晰型的层次数据可视化方法。

树图则是另一类层次数据可视化方法的代表。它使用具有一定面积的块、体来表示数据中的个体，使用节点之间的空间位置包含关系来表示个体之间的关系。作为空间高效型层次数据可视化方法<sup>[3]</sup>，树图能够更充分地利用屏幕空间，以利于呈现更大的层次化数据，还能够通过其节点的大小、位置重点表现数据节点的量化属性和分布关系，让用户快捷地对整个数据的分布情况有所了解；其不足之处则在于数据个体间的层次、包含、相邻关系不如节点链接图中呈现得明显。

目前，已有众多形态不一的层次数据可视化方法，或结合多种方法设计适用不同数据的可视化系统，但很多工具和系统难以严格归类。本文认为树图在本质上是一种以（数据关系-内隐空间关系）映射来呈现层次数据的思路，这种映射表现为用空间表示数据个体，用空间之间的包含、覆盖、相邻等内隐关系表示层次数据间的逻辑关系。在这种界定下，Johnson 等在树图创始工作<sup>[1]</sup>中提出的严格使用矩形划分二维屏幕空间的方法，以及基于此方法的直接改进为树图的基本算法；其他使用或结合这种映射思想的可视化方法可视为树图可视化方法的扩展。本文在详细介绍和分析基本树图可视化方法的同时，也广泛地简介其他树图可视化的扩展方法和系统，并对其效果和实用性进行分析总结。

## 1 树图的基本布局算法、属性设计和交互设计

树图的基本布局算法、属性设计和交互方法是树图可视化方法的核心，也是树图研究的主要内容。

### 1.1 树图布局算法

树图中矩形节点的布局算法体现为递归地细分屏幕空间成矩形块，整个矩形表示层次化数据中的最高层级（例如文件系统树的根节点，或是所有数据

的集合），较低一层的节点根据各自的权重的比例划分高层节点矩形的面积，它们的子节点再递归地划分各自的父节点。树图的基本布局算法，就是在给定树层次结构、节点权重和节点序列下，决定如何在二维的平面上排布矩形的方案。由于布局算法的递归特性，因此只需定义出对任意一个父节点如何划分为其直接子节点的策略，就定义出了整个布局算法。图 1 所示为 6 种不同基本树图布局算法的效果对比，数据为随机生成，颜色越深，节点权重越大。

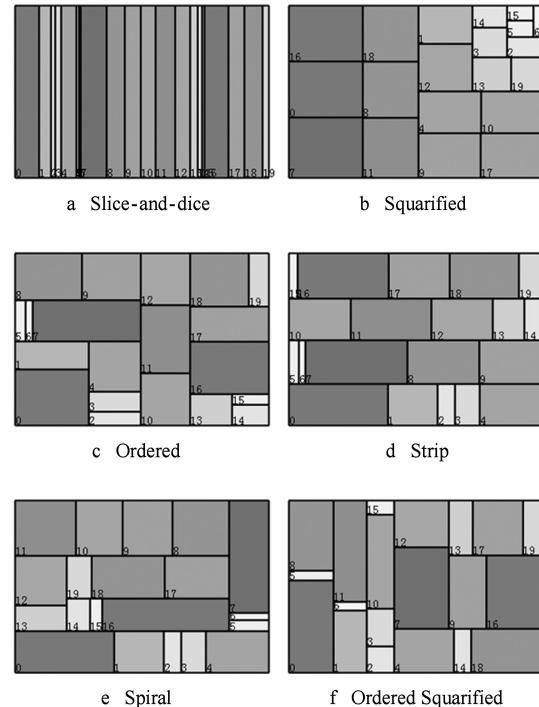


图 1 不同树图布局算法的效果对比

最早的 Slice-and-dice Treemap<sup>[1]</sup> 的布局算法在不同的层级交替使用横切和纵切来划分父节点，以帮助使用者分辨树图中的层次结构。该布局算法的缺陷在于会产生非常细长的矩形节点，很不利于用户视觉上的辨认和交互操作。

Bruls 等在 2000 年提出了更具实用性的 Squarified Treemap<sup>[4]</sup>，增强了静态树图的视觉体验和可视化效果。该算法力图使生成的节点尽量接近矩形，使用一种贪心策略来平衡算法效果和效率。当划分每一个节点时，其按权重从大到小加入子节点，并比较 2 种加入的位置，按加入后的整体长宽比选择其中较好的一个。因其生成的节点具有很好的长宽比，使树图更加美观和便于操作，但缺点是当节点的权重发生变化时，新旧树图会有很大的跳变，视觉效果不连续。而在静态数据情况下，该算法受到了广泛的欢迎。

Ordered Treemap<sup>[5]</sup>,也称 Pivot Treemap,是另一种改进矩形长宽比的算法,它试图兼顾节点的长宽比和保持数据中的节点顺序.该算法采用逐步求精的思路,每次从节点序列中挑选一个支点节点,将其他节点分成3个子序列,对应地将矩形切分成4个子矩形,再递归地划分这3个子序列.挑选支点节点的策略包括挑选最大的权重、中位数编号和最好的结果长宽比. Ordered Treemap 在树图的平均长宽比和位置稳定性上寻求平衡.

基于 Squarified Treemap, Bederson 等提出了 Strip Treemap<sup>[6]</sup>,用简单的策略达到了较好的效果.该算法按节点原有顺序,沿固定方向一次一条带地划分节点,根据新加入节点对平均长宽比的影响,决定加入当前条带还是开始新的条带. Tu 等的 Spiral Treemap<sup>[7]</sup>则是对 Strip Treemap 进一步的改进,其改变按固定方向划分条带的策略,采用螺旋式由外向内地划分条带,以保证数据中相邻的节点所对应的矩形也在空间上相邻.

考虑层次数据的空间属性,Wood 等<sup>[8]</sup>发展了 Ordered Squarified Treemap 和 Spatially Ordered Treemap.他们指出已有算法都会使节点的距离关系不确定,用户难以快速定位具有特定序号的节点. Ordered Squarified Treemap 基于距离安排节点的排布顺序,使用 Squarified Treemap 的长宽比判据具体确定每个子矩形的位置,能够更好地支持用户按节点序号寻找节点. Spatially Ordered Treemap 则用于具有二维空间属性的层次数据,使用数据的空间属性粗略定位,加上树图的矩形排布,其适用于呈现地理统计数据.

在发展和评价树图算法的过程中,研究者们定义了相关计算指标作为评价算法的参考,包括平均

长宽比<sup>[5]</sup>、稳定性(平均位置变化的倒数)<sup>[5]</sup>、可读性<sup>[6]</sup>、连续性<sup>[7]</sup>、稳定性的平衡性(位置变化的标准差的倒数)<sup>[7]</sup>和距离相关性<sup>[8]</sup>.平均长宽比对视觉效果和交互便利性的重要性毋庸置疑.稳定性衡量面对权值不断变化的动态数据时树图布局的稳定程度,其对呈现动态数据时的效果非常重要.稳定性的平衡性衡量面对动态数据布局的变化能否是较多节点轻微变化,而非少量节点巨大的突变.可读性评价树图中序号相邻的节点在确定空间方向上线性排列的比率.连续性类似于可读性,指序号相邻的节点在空间上也相邻的比率.距离相关性衡量兄弟节点的序号关系能否在与父节点的空间距离上得到体现.对这些属性,已有工作<sup>[5-8]</sup>或对算法进行定性分析,或用人造随机数据定量分析,以评价不同树图布局算法,但尚未有工作系统地比较所有布局算法在所有属性上的表现.我们总结不同工作中的结果<sup>[5-8]</sup>,并直接分析部分算法的思路,得到表1所示不同布局算法在所有这些计算指标上的优劣比较.由于布局算法的差异,树图使用者根据需要选择. Kong 等<sup>[9]</sup>的实验评价表明,树图的整体布局不仅应当避免过差的长宽比,也需要避免太均匀分布的正方形. Slingsby 等<sup>[10]</sup>对复杂时空数据上应用不同树图算法的效果进行了分析,提出了一些分析任务、数据类型与布局算法想匹配的设计准则.例如,使用多层 Slice-and-dice Treemap 嵌套,呈现具有周期性的年-月-日层次数据;使用按节点权重排序进行布局的 Squarified Treemap 完成基于排序的分析任务;固定特定层次上节点的大小,将有利于大范围地比较它们的子节点等.使用者选择布局算法时,也需要注意其与数据和应用场景的匹配.

表1 树图布局算法的比较

树图布局算法	算法思路	平均长宽比	稳定性	可读性	连续性	稳定性的平衡性	距离相关性
Slice-and-dice	横纵向交替划分节点	☆	☆☆☆	☆☆☆	☆☆☆	☆☆☆	☆☆☆
Squarified	贪心策略保证局长宽比	☆☆☆	☆	☆☆	☆☆	☆☆	-
Ordered	逐步求精,长宽比和可读性的折衷	☆☆	☆☆	☆☆	☆☆	☆☆	-
Strip	沿固定方向按条带地划分	☆☆	☆☆	☆☆	☆☆	☆☆	-
Spiral	由外向内螺旋状划分	☆☆	☆☆	☆☆	☆☆☆	☆☆☆	-
Ordered Squarified	按节点序号及与父节点距离定位	☆☆	☆☆	☆	☆	-	☆☆☆
Spatially Ordered	以数据的二维空间信息粗略定位	☆☆	☆☆	-	-	-	☆☆☆

注:☆☆☆表示好,☆☆表示中等,☆表示差,“-”表示未知或无此项

## 1.2 树图的视觉设计

除了布局算法,树图的其他视觉属性也得到了

很多研究探索.其一是节点矩形的边框处理,Turo 等<sup>[11]</sup>讨论了树图中边框偏移量的影响,Nested

Treemap 中父子节点的边框以一定的偏移量相分离,而 Unnested Treemap 中会以重合的线处理。Nested Treemap 的边框分离策略虽然加强了节点层次关系的显示,但浪费了相当多的显示空间,并且由于边框面积的影响,无法准确地跨层次比较节点的权重。同时,Nested Treemap 中的节点边框可用来显示节点的标签(例如马里兰大学的 Treemap4 系统),而 Unnested Treemap 则无处显示标签,一些工作<sup>[10]</sup>采用了半透明文字标签的方式。Unnested Treemap 边框像素的宽度也需要仔细考虑,以平衡层次结构的清晰性和屏幕像素的浪费。

树图的节点颜色广泛用于表示文件类型等枚举类型的属性;亮度和饱和度则常被用于顺序类型的属性<sup>[8-10]</sup>。van Wijk 等<sup>[12]</sup>模拟三维物体的光照效果,设计了一种如图 2 所示非常有效而快速的效果 Cushion Treemap<sup>[12]</sup>。该方法给二维节点构造出看似枕状凸出的光照效果,能够将层次信息在一定程度上凸显出来,帮助识别数据中的层次结构。

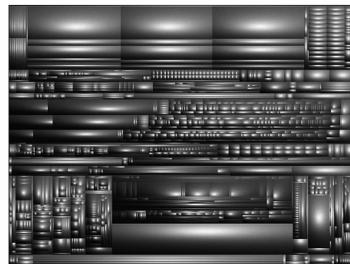


图 2 Cushion Treemap 的效果

由于基本树图采用的都是简单的矩形节点,并以局部最优的贪心策略作为生成算法,因此布局和显示中等规模数据时足以达到实时交互。Fekete 等<sup>[13]</sup>使用图形处理器来加速树图的绘制,实现了上百万节点数据的树图的实时显示和交互。

### 1.3 树图的交互设计

交互方法对使用树图深入探索层次数据的效果非常关键。通常树图交互方法包括信息可视化中常规的交互,如对数据对象的选择、高亮、筛选和改变,设置和调整对数据属性到视觉属性之间映射,并调整当前呈现细节数量等。树图独有的交互方法则来自于树图呈现数据的形式和特点,包括由树图层次性的呈现特点而产生的层次上行和层次下行操作,对自动生成的层次结构进行编辑的方法等。而对一些树图的交互难点需要专门的研究和设计,例如在树图中重叠的父子节点上进行数据选择时的二义性问题等。

根据算法复杂程度,树图中典型的交互方法大致可分为基本交互和新颖的焦点十上下文(focus+context)交互方法,对其归纳如表 2 所示。基本交互允许用户进行基本的数据选择、浏览、操作和对视觉效果的基本设置;而新颖交互方法包括近年来研究者提出的多种方法,如 Magic Lens<sup>[14]</sup>, Fisheye<sup>[15]</sup>, Semantic Zooming<sup>[16]</sup>, Balloon Focus<sup>[17]</sup>;它们结合了焦点十上下文和多重焦点(Multi-focus)等思想,增强了基本树图的可用性和数据探索能力。

表 2 树图中的交互方法

类别	交互方法	功能和效果
基本交互方法	节点选择	选中树图中的特定节点,由于父子节点的矩形相重叠,需判断选中节点的层次
	权值的改变	选中节点后,改变其权值,重新生成树图
	颜色的赋予和改变	选中节点后,赋予或改变矩形的颜色
	层次下行	选中某节点后,放大显示以此节点为根节点的子树
	层次上行	层次下行操作的反向,显示以当前根节点的父节点为根节点的子树
	布局算法的切换	改变布局算法,重新生成树图
焦点十上下文交互方法	Magic Lens	对感兴趣的一个或多个子节点给予放大,再覆盖显示在全局的树图上方
	Fisheye	以生成的全局树图的图像作为输入,应用图像处理技术中的变换方法,生成整体结构不变但部分区域得到平滑放大的新树图
	Semantic Zooming	在放大 Slice-and-dice Treemap 中感兴趣节点时,有限度地压缩其他节点
	Balloon Focus	将关注的节点与周围节点的关系用弹簧模型进行建模,通过求解弹簧平衡的线性方程组来均匀放大多个关注的节点,压缩非关注的节点

由于树图中父子节点占据着重叠的矩形空间,因此选中节点时会产生有判断选取层次的问题,仅

选取表面节点的简单设计使用户无法选中需要的中间节点。马里兰大学的 Treemap4 系统中,通过其

Nested Treemap 风格<sup>[1]</sup>的边框设计直接解决此问题。在 Elastic Hierarchy<sup>[3]</sup>中,用户需通过一个额外的选择栏指定选取的层次。Blanch 等<sup>[18]</sup>提供了基于相交的节点选择方法,用户在树图上画出路径,系统自动选中与整条路径相交的最接近叶的节点。

大规模数据的树图可视化中,深层节点常常呈现为难以看清的小矩形,层次下行和上行是探索深层次细节信息必不可少的基本方法<sup>[11]</sup>。层次下行后若从当前根节点直接生成新的树图,由于矩形长宽比的变化,会使树图结构跳变、层次下行前后树图中的节点难以对应和理解。Blanch 等<sup>[18]</sup>提出了系统的树图漫游方法,在层次上下行时保持稳定的矩形长宽比,用渐变的缩放和平移动画辅助节点漫游,并在层次下行后提供图 3<sup>[18]</sup> 所示高层节点的上下文信息,改进了树图漫游的交互体验。

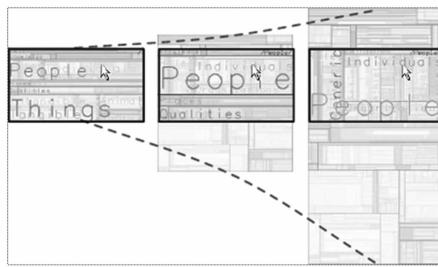


图 3 平滑的层次下行交互方法

层次下行操作虽然显示了更多的细节,但会影响整体结构的呈现,许多研究者设计焦点+上下文交互方法来同时显示焦点处的细节和高层的结构<sup>[14-17]</sup>。焦点+上下文交互思想要求可视化方法同时呈现局部细节和整体上下文信息,支持用户在探索细节时把握全局信息,免除记忆当前状态的负担,支持连贯无缝地对数据进行探索。MagicLens<sup>[14]</sup>方法允许放大树图中感兴趣的一个或多个局部区域,并将其覆盖显示在全局树图上方。Keahey<sup>[15]</sup>在全局树图上采用图像处理中的 Fisheye 技术,生成全局结构不变、局部区域平滑放大的新树图。Shi 等<sup>[16]</sup>给出了 Slice-and-dice Treemap 上的 Semantic zooming 方法,允许在放大感兴趣的节点时,有限度地压缩其他节点。如图 4<sup>[17]</sup>所示,Tu 等的 Balloon Focus<sup>[17]</sup> 支持多重焦点,使用弹簧系统的模型实现对多个关注节点的均匀放大和其他节点的均匀压缩,节点间相互位置关系也在一定程度上得以保持。Elastic Hierarchy<sup>[3]</sup>中,从一个全局树图中引出局部数据的节点链接图,也可以看作是一种焦点+上下文的局部放大交互。

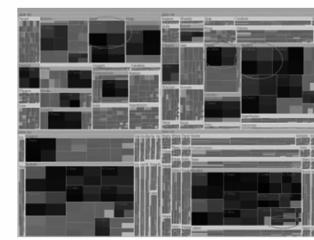


图 4 支持多重焦点的局部放大交互

对于层次数据的比较,Tu 等<sup>[7]</sup>提出了一种利用树图呈现层次结构变化的方法。该方法用树图直接显示变化前后数据的并集树,并在每个节点矩形中用对角的分界线或直方图来呈现变化前后的对比。虽然大部分树图实现默认用户在整个树图中使用同一种布局算法,但提供更加自由的布局算法设定能力和相应交互方法,能更好地探索复杂数据。Slingsby 等<sup>[10]</sup>设计了一种脚本语言,允许使用者自由定制混合的布局算法。

## 2 树图可视化的扩展

除了基本树图中用矩形划分二维屏幕空间的方法,树图中蕴含的(数据关系-内隐空间关系)映射思想得到了研究者们充分的发挥,产生了如图 5 所示大量的树图可视化的扩展方法,如 Voronoi Treemap<sup>[19]</sup>, 三维的 Circle Packing<sup>[20]</sup>, SunBurst<sup>[21]</sup>, TreeCube<sup>[22]</sup>。

一大类树图扩展来自对基本树图的矩形节点要求的改变。Bederson 的 Bubblemaps<sup>[23]</sup> 放松矩形的限制,允许子节点之间如拼图般镶嵌。Balzer 等提出 Voronoi Treemap<sup>[19]</sup>, 使用计算几何中常用的 Voronoi Diagram 及生成算法,构造出如图 5 a 所示以凸多边形或曲边凸多边形为节点的树图。Circular Partitions<sup>[24]</sup> 算法能够为层次数据生成具有较好长宽比的凸多边形划分,还可以方便地扩展到更高维的空间。de Berg 等<sup>[25]</sup> 提出的布局算法允许节点为正交凸多边形,能够保证输出的布局具有与输入数据无关的优异长宽比。Wattenberg<sup>[26]</sup> 在讨论了隐式层次数据可视化应有的布局特性后,提出了 Jigsaw Map 这种利用 Space-filling Curve 上的一维划分构造出的二维布局算法,其在动态数据和层次结构极不平衡的数据上都能保持较好的连续性和清晰性。

另一些树图扩展的可视化方法舍弃了父子节点严格覆盖的要求,它们通常放弃自顶向下划分,而

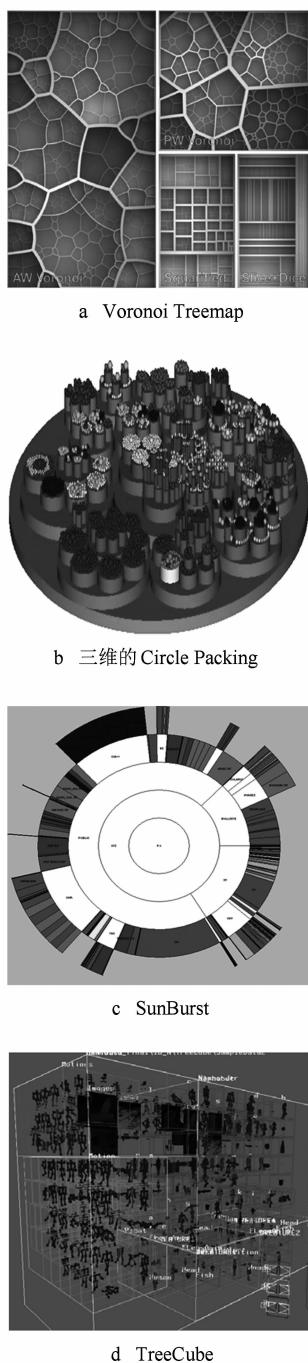


图 5 树图可视化的扩展方法

采用自底向上逐步组合的方式构造层次结构。这类方式允许使用节点间非紧密相邻的圆、球等形状，以达到更好的长宽比或更清晰的层次等效果。Circle Packing<sup>[20]</sup> 使用圆形作为节点的形状，使节点具有如图 5 b 所示最佳的长宽比。虽然仍为矩形节点，Bederson 等的 Quantum Treemap<sup>[6,23]</sup> 为了呈现具有有限的离散权值的层次数据，诸如图片库等应用，允许子节点不完全填满父节点的面积，以保证矩形块的边长具有给定最小长度的整数倍。Itoh 等的

HeiankyoView<sup>[27]</sup> 使用等大的正方形小图标表示叶节点，使用矩形表示非叶节点，自底向上地构造且不要求填满父矩形，并给出了多种填充父矩形的算法。

更进一步，将父子节点包含的关系替换为其他空间关系，也有很多类似的可视化方法。这些空间关系主要为相邻关系，也有少量部分覆盖的关系。Icicle Plot<sup>[28]</sup> 是最早的使用相邻关系的内隐式层次数据可视化方法，父子节点相邻于竖直方向，兄弟节点在水平方向上排成一列；该方法最初用于对层次化的数据聚类结果进行可视化，并支持方便、快捷地对数据个体标签的查找。该可视化方法对树图扩展的发展也产生了很大的影响和启示。还有多项工作使用类似于饼图的形式，以二维扇形或环形为节点，沿同心圆半径增加方向相邻的空间关系表现数据的层次关系，发展了如图 5 c 所示 Sunburst<sup>[21]</sup> 及类似的层次数据可视化方法，并设计了相应的层次上下行和焦点+上下文交互方法。Cheops<sup>[29]</sup> 中也使用类似的相邻关系，但其以三角形为节点的形状，并为了支持更大规模的层次数据，允许兄弟节点进行一定的重叠和聚合。van Ham 等设计了只要求子节点的一部分与父节点相覆盖的 BeamTree<sup>[30]</sup> 方法。

三维树图的工作中，常见的有城市图景隐喻<sup>[31]</sup> 和容器隐喻<sup>[32]</sup> 2类方法。例如，使用容器隐喻，TreeCube<sup>[22]</sup> 用三维空间中的长方体代表节点，父节点长方体包含子节点长方体，将长方体以半透明或骨架的渲染风格应用于图片、影像、三维模型数据，达到了图 5 d 所示不错的效果。Bladh 等的 StepTree<sup>[33]</sup> 使用城市图景隐喻，给树图中的矩形赋予三维空间中的高度，使父子节点在纵深方向上分开，更好地强调数据的层次结构。Icicle Plot<sup>[28]</sup> 的三维形式具有和 StepTree 类似的效果。Circle Packing<sup>[20]</sup> 和 Sunburst<sup>[34]</sup> 也都有各自使用城市图景隐喻扩展成的三维版本。Chaudhuri 等的 Self-adaptive 3D Treemaps<sup>[35]</sup>，允许用户将树图的一部分翻折 90° 扩展到第 3 个维度，并通过改变显示的角度和树图节点的高度，实现关注全局信息和关注细节信息间的平滑转换。Lü 等<sup>[36]</sup> 和 Liu 等<sup>[37]</sup>，分别提出了相似的 Cascaded Treemap 和 2.5D Treemap，此方法将树图中父子节点的二维包含关系改造为伪三维效果的层叠关系，能够更好地凸显不同的层次和层次间关系。

树图结合其他可视化方法也产生了众多扩展的可视化方法和系统。Elastic Hierarchy<sup>[3]</sup> 将树图和节点链接图自由的结合，允许用户可视化层次数据时

在任何位置选择树图或节点链接图，并创造了相应的交互方法。由图6<sup>[3]</sup>可见，Elastic Hierarchy中从节点链接图的节点展开出的树图，并从树图的节点中展开出的节点链接图。Linked treemap<sup>[38]</sup>将树图和节点链接图在三维空间中结合，节点链接图中的边在垂直于树图平面的第3个维度上展开，并与树图相交于当前关注的数据层级。Vliegen等<sup>[39]</sup>为了将树图更好地应用到商业场合中，系统地提出了与现有商业图表形式结合的Generalized Treemap<sup>[39]</sup>系列方法，让树图的布局方法成为柱状图、饼图、金字塔图、节点链接图等中自由嵌入的一部分。Spatially Ordered Treemap<sup>[8]</sup>是树图与地理信息可视化需求相结合的结果。Buchin等发展的Adjacent-Preserving Spatial Treemaps<sup>[40]</sup>作用于地理信息数据，能够保持数据中的空间聚类关系和空间邻接关系，提供对地理统计信息更好的层次划分和树图可视化呈现。

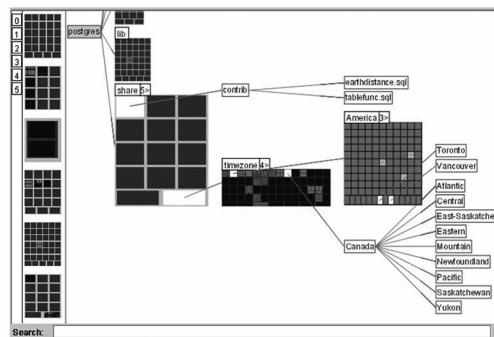


图6 Elastic Hierarchy中树图和节点链接图的紧密结合

综合考察内隐层次数据可视化方法，Schulz等<sup>[34]</sup>提出至少可以从4个维度对这些已有方法进行分类和比较：空间维度、边的表示、点的表示和构成方式。从这些维度比较树图可视化扩展方法的共性和差异，对理解它们的设计空间非常有帮助。

空间维度是指可视化结果所使用的空间的维度，它大部分是二维，少部分使用了三维的空间；边的表示指对层次数据中的父子关系、兄弟关系进行表示的方式，最常见的是包含关系，其次是相邻关系，还有少量的是部分覆盖关系；点的表示是指单个数据的表示形式，最常见的是矩形/立方体，还有椎体、三角形、多边形、圆/柱/球、椭圆/椭球等多种形式；构成方式是指整个数据的可视化的构成方式，首先可以分为自顶向下细分型和自底向上组合型，再加上细分或结合时涉及的维度数，共有6种构成方式。表3所示为部分树图和树图扩展可视化方法的分类结果。

表3 部分树图和树图扩展可视化方法的分类

方法	维数	边的表示	点的表示	构成方式
Treemap	2	包含	矩形	2↓
Icicle Plot	2	相邻	矩形	1↓
Spatially Ordered	2	包含	矩形	2↓
Quantum	2	包含	矩形	2↓+↑
Bubblemap	2	包含	多边形	2↓+↑
HeiankyoView	2	包含	矩形	2↑
Voronoi	2	包含	多边形	2↓
Circular Partitions	2	包含	多边形	2↓
Jigsaw Map	2	包含	多边形	1↓
Circle Packing	2	包含	圆形	2↑
BeamTree	2	覆盖+包含	矩形	
SunBurst	2	相邻	扇/环	1↓
Cheops	2	相邻	三角形	1↑
Cascaded	2	覆盖	矩形	2↓
2.5D	2	覆盖	矩形	2↓
TreeCube	3	包含	长方体	3↓
StepTree	3	相邻	长方体	2↓
3D Circle Packing	3	相邻	圆/柱/球	2↑
3D BeamTree	3	相邻+包含	柱形	1↓
3D Icicle Plot	3	相邻	长方体	1↓
3D SunBurst	3	相邻	扇/环/球/轮	2↓
Self-Adaptive 3D Treemap	3	包含	长方形	2↓

注：↓表示自顶向下细分，↑表示自底向上组合。

### 3 树图的效果评估

已有一些工作通过比较树图与其他方法用于层次数据分析上的表现，并对树图可视化的效果进行了评价。早期Stasko等<sup>[41]</sup>比较了Slice-and-dice Treemap<sup>[1]</sup>与SunBurst<sup>[21]</sup>在文件系统可视化上的效果，结果表明SunBurst在正确率、速度和用户偏好上都具有一定的优势。在数据挖掘系统的背景下，Barlow等<sup>[42]</sup>对Slice-and-Dice Nested-Treemap，Icicle Plot<sup>[28]</sup>，Organization Chart和Tree Ring可视化方法进行了比较研究，树图在实验中表现较差。但Barlow等也指出这与Nested-Treemap中的边框问题有关，该问题在更早的工作<sup>[11]</sup>中也得到过讨论。Kobsa<sup>[43]</sup>对马里兰大学的Treemap3.2系统，荷兰埃因霍温科技大学的SequoiaView系统，van Ham等的3D BeamTree<sup>[30]</sup>，两款节点链接图工具，

以及 Microsoft Explorer 进行了比较和评估,结果表明,与树图相关的系统在完成任务的正确率、速度和使用者满意度上都具有相当不错的效果。

研究者也对树图的视觉设计、交互方法和算法选择进行了评估。Kong 等<sup>[9]</sup>的用户实验评价表明,用树图中矩形亮度值呈现其他信息对矩形大小的判断和比较没有显著影响。Irani 等<sup>[44]</sup>探讨了阴影效果在人眼物体识别中的作用,并用实验比较了 Cushion Treemap<sup>[12]</sup> 和普通线框绘制的 Treemap;结果表明,Cushion Treemap 更利于用户理解层次数据中的结构,并且对权重比较没有显著的影响。通过比较树图中普通层次上下行操作与焦点+上下文交互方法的效果,Shi 等<sup>[16]</sup> 证明了焦点+上下文交互方法的优势。Herbert 等<sup>[45]</sup> 评估了将 Cushion Squarified Treemap<sup>[4,12]</sup> 和 Sunburst<sup>[21]</sup> 用在少数派博奕游戏的用户界面上的效果,评价显示树图在多项任务上优于或至少与 Sunburst 具有相同表现,但用户更偏爱 Sunburst。

Ziemkiewicz 等<sup>[32]</sup> 通过树图和节点链接图的比较实验,验证了一个重要的猜想,即视觉隐喻是信息可视化方法达到传达信息效果的基础。视觉隐喻是指数据中的关系到视觉上的关系的知觉映射。他们准备了 2 组描述层次数据组织的指导语,引导使用者产生不同的视觉隐喻:父节点包含子节点,如大盘子中装小盘子的效果;或是父节点在子节点的上层,如同高低台阶间的关系。接着让被试使用图 7<sup>[32]</sup> 所示树图或节点链接图完成理解层次数据的任务,结果表明,当指导语中的视觉隐喻与所用可视化方法相匹配时——包含关系描述与树图一同出现,或高低台阶描述与节点链接图一同出现时——使用者的表现比不匹配时更好。他们的工作表明,可视化方法和视觉隐喻的匹配才能更大发挥可视化的效果,研究者需要更深入地思考可视化中的视觉隐喻,设计与用户习惯更匹配的视觉隐喻和可视化方法;在

评价可视化方法的工作中,也应当更加注意指导语中描述方式的影响。

我们也设计和实施了简单的用户实验,对部分典型树图布局算法进行了比较,并对前人评价树图算法的几个计算指标进行了有效性验证。

实验考察树图布局算法对 3 种不同任务完成效果的影响:在层次数据中理解结构,定位特定节点和比较节点权重。每部分均为单因素组内设计,自变量为树图布局算法命名型数据,包含 5 个水平:Slice-and-dice, Squarified, Ordered, Strip 和 Spiral。分别采用 3 种任务的完成时间为因变量。被试的操作任务分别为:判断树图中根节点的一级子节点的个数;在树图中选中名为 Node\_xx 的叶节点( $xx$  为节点序号);比较蓝色和红色边框节点的大小。

实验被试为 8 名北京大学的本科生和研究生,均为男性,年龄 22~24 岁。实验时使用的树图为每个试次自动生成,在一定参数限制下具有随机性。系统自动记录该树图的平均矩形长宽比和可读性,同时显示被试的操作任务。被试依次完成 3 部分实验,每部分 25 个试次,其中每种布局算法 5 次,布局算法出现的顺序用 5 阶拉丁方进行了设计。系统自动记录用户每次完成任务的时间和正确与否,每名被试完成实验任务平均花费 20 min。

实验共记录到 600 试次的数据,剔除错误回答,有效试次共 578 个,完成时间的描述统计结果如表 4 所示,其中数值为均值(标准差),单位为 s, 时间越短表示算法的表现越好。对完成时间进行重复测量方差分析,在理解结构和比较大小的任务上, Slice-and-dice 最差, Squarified 和基于它的 Spiral 和 Strip 表现都较好,这表明好的矩形长宽比能够让用户更容易地理解数据的结构和比较权重。在寻找节点的任务上, Slice-and-dice 表现最好, Squarified 最差,这是由于 Squarified 完全不考虑输入数据的顺序,而其他 3 种算法不同程度地照顾数据逻辑上的相邻性质,方便用户能够发现定位节点的规律。

表 4 完成时间的描述性统计结果

方法	理解层次	定位节点	比较大小
Slice-and-dice	9.27(2.98)	7.88(1.80)	4.14(0.59)
Squarefied	7.19(1.89)	11.38(2.51)	3.25(0.59)
Ordered	8.17(2.47)	8.26(2.10)	3.50(0.88)
Strip	6.93(1.75)	8.02(2.55)	3.58(0.81)
Spiral	6.47(1.45)	9.81(2.45)	3.25(0.52)

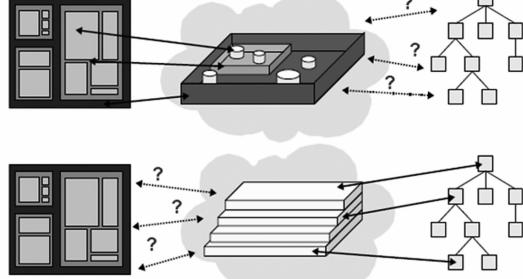


图 7 视觉隐喻与可视化方法的匹配对可视化效果的影响

考察自动评价指标的结果和用户的完成时间的相关性结果如表5所示。该结果表明,平均长宽比越好(值越小),理解结构和比较权重的任务就完成的越好(时间越短),定位节点则表现越差;而可读性越好(值越大),定位节点的效果就越好,理解结构和比较节点大小的任务完成结果就越差。这表明,这2种指标与它们想要表达的树图的性能基本一致,能够较好地衡量树图布局算法的优劣;并且可以看到,这2种指标往往互相排斥,难以两全,因而树图布局算法的设计者和使用者需要作相应的取舍,达到最好的平衡。

表5 自动评价指标与完成时间的相关

指标	理解层次	定位节点	比较权重
平均长宽比	0.24**	-0.16*	0.15*
可读性	0.20**	-0.19**	0.15*

注: \* 表示相关显著  $p < 0.05$ , \*\* 表示相关显著  $p < 0.01$

## 4 树图的应用

除了对树图效果的评价研究,更多遍布科学、工程、信息科学、社会科学、金融和日常生活等领域的应用也从另一方面证实了树图的实用性。

将高维数据自动或手动划分转化为层次化数据,再用树图进行可视化的方法也得到了广泛的采用<sup>[10,39,46-48]</sup>。Cao等<sup>[49]</sup>设计了一种基于树图的小图标可视化方法,对高维数据聚类结果进行呈现,以呈现数据、特征、聚类之间的关系,并支持不同聚类结果间的比较。Slingsby等<sup>[10]</sup>探讨了如何将复杂时空高维数据划分为层次数据,并应用树图可视化应对不同的分析任务。他们也探讨了面对不同的分析任务和数据划分,并选取合适布局算法的准则。

文件系统是现代生活中人们最熟悉的层次数据之一,也非常适于用树图呈现。如对文件目录系统进行可视化<sup>[1]</sup>,对目录树中的照片文件进行可视化<sup>[6,23]</sup>,对包含地理信息的海量照片文件的可视化<sup>[8]</sup>,个人电子资源的监测和管理<sup>[50]</sup>等。也已有很多简单易用的公开软件供大众用于电脑文件系统的可视化,如SequoiaView和WinDirStat等。

科学领域中一些具有层次化或高维数据的领域也使用树图作为数据呈现方法,如分子生物学领域中的基因序列数据<sup>[51]</sup>、蛋白质数据<sup>[47]</sup>等。社会科学研究中,有很多使用树图对社会网络结构<sup>[46]</sup>、地区统计信息<sup>[52]</sup>等进行可视分析的例子。

信息技术领域的例子更不可胜数。层次化的软件数据常见于树图可视化效果的范例<sup>[36]</sup>,其他例子包括对网络数据、分布式计算环境、搜索结果、多媒体库等多种复杂数据等<sup>[22,48,53,54]</sup>。Wang等<sup>[55]</sup>使用树图对多分辨率体可视化的误差进行了分析,则是对另一个可视化方法效果的可视化。

商业数据分析有着巨大的商业价值,对信息可视化方法有着很大的需求。树图一方面是商业数据分析中常用的方法,另一方面由于其良好的交互效果,也常被作为交互界面。对商业和资金数据的可视化实例包括股票市场行情的可视化,eBey网拍卖数据的可视化<sup>[36]</sup>,科研经费使用情况的可视化<sup>[37]</sup>等。Vliegen等的Generalized Treemap<sup>[39]</sup>更是专门为树图在商业领域中的应用而进行的可视化方法与使用者习惯的结合。

还有很多树图可视化的有趣应用,例如,对美国NBA联盟球队数据的可视化<sup>[7]</sup>,对网球比赛过程的可视化<sup>[14]</sup>等。更有研究者将树图布局算法用于数据分析以外的用途,例如将Squarified Treemap的布局算法用于了房屋楼面设计<sup>[56]</sup>,将树图布局用于操作系统的窗口切换界面<sup>[57]</sup>等。

## 5 树图研究和应用的展望

在树图诞生之后的20年里,通过大量的后续研究和应用案例,研究者证明了其作为数据可视化工具的价值。相比于其他类似方法,树图的成功一方面源自它的取舍:放弃层次结构的外显呈现,牺牲一定的层次清晰性,但获得了更大规模数据的呈现能力;另一方面源自它的简洁和设计开放性:二维空间中的矩形并无其他要求,但又能够通过色彩、边界、位置、光照及形状等效果进行丰富的扩展。因此,使树图这样一种简单的理念产生了丰富的外延和众多的应用。

树图在概念和实现上都相当简单,越来越多的场合都能够见到它的身影:从Treemap 4, Treemappa, InfoVis Toolkit, Prefuse等专门的可视化工具或语言库,到Prefuse Flare, Jit, Google Chart Tools, ProtoVis等更易于互联网应用接受的Flash和JavaScript实现,以及IBM Many Eyes等在线工具。除了桌面应用,手机、平板电脑等掌上设备中也越来越常见到树图的使用,媒体也更频繁地使用树图来对重大新闻、体育比赛和选举等事件进行呈现。

由于树图中的高信息密度,在树图上支持快速、

深入的数据浏览的交互方法是加强树图有效性的必备手段。新颖的支持焦点+上下文的交互方法在已有相当多的对树图交互方法的研究中表现出了很大的优势,但更加易于理解和使用、统一、系统化的交互方法依然有待完善,树图中与数据深入交互的方法也有待提出。随着多点触控输入设备的普及和流行,树图如何结合多点触控的交互方式与自身同时呈现的信息多、密度大的特点,提供更适宜的新颖交互能力,是值得研究的问题。

对高维数据分析,人们已经尝试了多种在树图基础上呈现高维数据,以及呈现带有高维附加信息的层次数据的方法(如地理位置信息、文件类别信息、变化趋势信息等)。如何对这些编码了更多信息的可视化方法进行研究和比较,以建立最符合人们习惯、最有效呈现信息的设计形式,仍然需要深入的探索。

相比于柱状图、折线图、饼图等完全融入日常生活的数据表示方法,树图具有更强大的数据呈现能力,但也更不易被普通用户使用,其原因是人在面积感知上更不精确,更易产生数据理解的误差。研究评估不同形式误差产生的原因、程度,从而理解并给出如何通过相应的设计,以满足不同的误差控制的需要,是将树图推广到日常应用中所迫切需要解决的问题。

传统的树图以其二维的简洁性达到了呈现数据的高效性和用户理解的易用性之间的平衡。很多后续研究尝试将其扩展到三维空间中来进一步增强其数据呈现能力,但往往由于易用性的降低而不能达到很好的效果。随着三维交互研究的进展,新的三维交互手段将更加易用和快捷,更易于用户与三维可视化间的交互;相信树图向三维形式的发展依然有着一定的潜力。

国内信息可视化的研究和应用还处于起步阶段,对树图的研究和应用也相当有限,但还是产生了一些颇有影响的成果。如中国科学院软件所的 Circle Packing<sup>[20]</sup>工作,是树图扩展中重要的一种,有相当的创新性和应用价值。国内研究人员在中文学术刊物上也发表了一些树图相关的工作<sup>[58-61]</sup>;在不远的将来,预期能看到更多国内同行在树图研究上的重要成果。

为了使树图能够为更多大众所接受和使用,依然需要开展更深入的树图应用研究,验证其在更广泛类型的数据呈现中的效果。另一方面,也需要提供更加便于使用的树图工具,或是能够嵌入到现有工具(如 Office)中的插件,以给更多用户接触使用的机会。

## 参考文献(References):

- [1] Johnson B, Shneiderman B. Tree-maps: a space-filling approach to the visualization of hierarchical information structures [C] //Proceedings of IEEE Visualization Conference. Los Alamitos: IEEE Computer Society Press, 1991: 284-291
- [2] Robertson G G, Mackinlay J D, Card S K. Cone trees: animated 3D visualizations of hierarchical information [C] //Proceedings of ACM CHI Conference on Human Factors in Computing Systems. New York: ACM Press, 1991: 189-194
- [3] Zhao S, McGuffin M J, Chignell M H. Elastic hierarchies: combining treemaps and node-link diagrams [C] //Proceedings of IEEE Symposium on Information Visualization. Los Alamitos: IEEE Computer Society Press, 2005: 57-64
- [4] Bruls M, Huizing K, Van Wijk J J. Squarified treemaps [C] //Proceedings of Joint Eurographics and IEEE TCVG Symposium on Visualization. Aire-la-Ville: Eurographics Association Press, 2000: 33-42
- [5] Shneiderman B, Wattenberg M. Ordered treemap layouts [C] //Proceedings of IEEE Symposium on Information Visualization. Los Alamitos: IEEE Computer Society Press, 2001: 73-78
- [6] Bederson B B, Shneiderman B, Wattenberg M. Ordered and quantum treemaps: making effective use of 2D space to display hierarchies [J]. ACM Transactions on Graphics, 2002, 21(4): 833-854
- [7] Tu Y, Shen H W. Visualizing changes of hierarchical data using treemaps [J]. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, 2007, 13(6): 1286-1293
- [8] Wood J, Dykes J. Spatially ordered treemaps [J]. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, 2008, 14(6): 1348-1355
- [9] Kong N, Heer J, Agrawala M. Perceptual guidelines for creating rectangular treemaps [J]. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, 2010, 16(6): 990-998
- [10] Slingsby A, Dykes J, Wood J. Configuring hierarchical layouts to address research questions [J]. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, 2009, 15(6): 977-984
- [11] Turo D, Johnson B. Improving the visualization of hierarchies with treemaps: design issues and experimentation [C] //Proceedings of IEEE Visualization Conference. Los Alamitos: IEEE Computer Society Press, 1992: 124-131
- [12] van Wijk J J, van de Wetering H. Cushion treemaps: visualization of hierarchical information [C] //Proceedings of IEEE Symposium on Information Visualization. Los Alamitos: IEEE Computer Society Press, 1999: 73-78+147
- [13] Fekete J D, Plaisant C. Interactive information visualization of a million items [C] //Proceedings of IEEE Symposium on Information Visualization. Los Alamitos: IEEE Computer Society Press, 2002: 117-124

- [14] Jin L, Banks D C. TennisViewer: a browser for competition trees [J]. IEEE Computer Graphics and Applications, 1997, 17(4): 63-65
- [15] Keahay T A. Getting along: composition of visualization paradigms [C] //Proceedings of IEEE Symposium on Information Visualization. Los Alamitos: IEEE Computer Society Press, 2001: 37-40
- [16] Shi K, Irani P, Li B. An evaluation of content browsing techniques for hierarchical space-filling visualization [C] //Proceedings of IEEE Symposium on Information Visualization. Los Alamitos: IEEE Computer Society Press, 2005: 81-88
- [17] Tu Y, Shen H W. Balloon focus: a seamless multi-focus + context method for treemaps [J]. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, 2008, 14(6): 1157-1164
- [18] Blanch R, Lecolinet E. Browsing zoomable treemaps: structure-aware multi-scale navigation techniques [J]. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, 2007, 13(6): 1248-1253
- [19] Balzer M, Deussen O. Voronoi treemaps [C] //Proceedings of IEEE Symposium on Information Visualization. Los Alamitos: IEEE Computer Society Press, 2005: 49-56
- [20] Wang W, Wang H, Dai G, et al. Visualization of large hierarchical data by circle packing [C] //Proceedings of ACM CHI Conference on Human Factors in Computing Systems. New York: ACM Press, 2006: 517-520
- [21] Stasko J, Zhang E. Focus + context display and navigation techniques for enhancing radial, space-filling hierarchy visualizations [C] //Proceedings of IEEE Symposium on Information Visualization. Los Alamitos: IEEE Computer Society Press, 2000: 57-65
- [22] Okajima S, Okada Y. Treecube+3D-ViSOM: combinational visualization tool for browsing 3D multimedia data [C] //Proceedings of International Conference on Information Visualization. Los Alamitos: IEEE Computer Society Press, 2007: 40-45
- [23] Bederson B B. PhotoMesa: a zoomable image browser using quantum treemaps and bubblemaps [C] //Proceedings of ACM Symposium on User Interface Software and Technology. New York: ACM Press, 2001: 71-80
- [24] Onak K, Sidiropoulos A. Circular partitions with applications to visualization and embeddings [C] //Proceedings of Symposium on Computational Geometry. New York: ACM Press, 2008: 28-37
- [25] de Berg M, Speckmann B, van der Weele V. Treemaps with bounded aspect ratio [M] //Lecture Notes in Computer Science. Heidelberg: Springer, 2011, 7074: 260-270
- [26] Wattenberg M. A note on space-filling visualizations and space-filling curves [C] //Proceedings of IEEE Symposium on Information Visualization. Los Alamitos: IEEE Computer Society Press, 2005: 181-186
- [27] Itoh T, Yamaguchi Y, Ikehata Y, et al. Hierarchical data visualization using a fast rectangle-packing algorithm [J]. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, 2004, 10(3): 302-313
- [28] Kruskal J B, Landwehr J M. Icicle plots: better displays for hierarchical clustering [J]. The American Statistician, 1983, 37(2): 162-168
- [29] Beaudoin L, Parent M A, Vroomen L C. Cheops: a compact explorer for complex hierarchies [C] //Proceedings of the 7th IEEE Visualization Conference. Los Alamitos: IEEE Computer Society Press, 1996: 87-92
- [30] van Ham F, van Wijk J J. Beamtrees: compact visualization of large hierarchies [J]. Information Visualization, 2003, 2(1): 31-39
- [31] Keskin C, Vogelmann V. Effective visualization of hierarchical graphs with the cityscape metaphor [C] //Proceedings of Workshop on New Paradigms in Information Visualization and Manipulation. New York: ACM Press, 1997: 52-57
- [32] Ziemkiewicz C, Kosara R. The shaping of information by visual metaphors [J]. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, 2008, 14(6): 1269-1276
- [33] Bladh T, Carr D, Scholl J. Extending tree-maps to three dimensions: a comparative study [M] //Lecture Notes in Computer Science. Heidelberg: Springer, 2004, 3101: 50-59
- [34] Schulz H J, Hadlak S, Schumann H. The design space of implicit hierarchy visualization: a survey [J]. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, 2011, 17(4): 393-411
- [35] Chaudhuri A, Shen H W. A self-adaptive treemap-based technique for visualizing hierarchical data in 3D [C] //Proceedings of IEEE Pacific Visualization Symposium. Los Alamitos: IEEE Computer Society Press, 2009: 105-112
- [36] Lü H, Fogarty J. Cascaded treemaps: examining the visibility and stability of structure in treemaps [C] //Proceedings of Graphics Interface. Ontario: Canadian Information Processing Society, 2008: 259-266
- [37] Liu S, Cao N, Lv H. Interactive visual analysis of the NSF funding information [C] //Proceedings of IEEE Pacific Visualization Symposium. Los Alamitos: IEEE Computer Society Press, 2008: 183-190
- [38] Linsen L, Behrendt S. Linked treemap: a 3D treemap-nodelink layout for visualizing hierarchical structures [J]. Computational Statistics, 2011, 26(4): 679-697
- [39] Vliegen R, van Wijk J J, van der Linden E J. Visualizing business data with generalized treemaps [J]. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, 2006, 12(5): 789-796
- [40] Buchin K, Eppstein D, Löffler M, et al. Adjacency-preserving spatial treemaps [M] //Lecture Notes in Computer Science. Heidelberg: Springer, 2011, 6844: 159-170

- [41] Stasko J, Catrambone R, Guzdial M, et al. An evaluation of space-filling information visualizations for depicting hierarchical structures [J]. International Journal of Human-Computer Studies, 2000, 53(5): 663–694
- [42] Barlow T, Neville P. A comparison of 2-D visualizations of hierarchies [C] //Proceedings of IEEE Symposium on Information Visualization. Los Alamitos: IEEE Computer Society Press, 2001: 131–138
- [43] Kobsa A. User experiments with tree visualization systems [C] //Proceedings of IEEE Symposium on Information Visualization. Los Alamitos: IEEE Computer Society Press, 2004: 9–16
- [44] Irani P, Slonowsky D, Shajahan P. The effect of shading in extracting structure from space-filling visualizations [C] // Proceedings of International Conference on Information Visualisation. Los Alamitos: IEEE Computer Society Press, 2004: 209–216
- [45] Herbert R D, Webber R, Jiang W. Measurement of space-filling techniques in simulating the minority game [C] // Proceedings of International Conference on Neural Networks and Brain. Los Alamitos: IEEE Computer Society Press, 2005: 542–547
- [46] Rodrigues E M, Milic-Frayling N, Smith M, et al. Group-in-a-box layout for multi-faceted analysis of communities [C] //Proceedings of the 3rd IEEE International Conference on Privacy, Security, Risk and Trust and the 3rd IEEE International Conference on Social Computing. Los Alamitos: IEEE Computer Society Press, 2011: 354–361
- [47] Halligan B D, Mirza S P, Pellitteri-Hahn M C, et al. Visualizing quantitative proteomics datasets using treemaps [C] //Proceedings of International Conference on Information Visualization. Los Alamitos: IEEE Computer Society Press, 2007: 527–534
- [48] Mansmann F, Keim D A, North S C, et al. Visual analysis of network traffic for resource planning, interactive monitoring, and interpretation of security threats [J]. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, 2007, 13(6): 1105–1112
- [49] Cao N, Gotz D, Sun J, et al. DICON: interactive visual analysis of multidimensional clusters [J]. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, 2011, 17(12): 2581–2590
- [50] Xu W J, Esteva M, Jain S D. Visualizing personal digital collections [C] //Proceedings of the 10th Annual Joint Conference on Digital Libraries. New York: ACM Press, 2010: 169–172
- [51] Sallaberry A, Pecheur N, Bringay S, et al. Sequential patterns mining and gene sequence visualization to discover novelty from microarray data [J]. Journal of Biomedical Informatics, 2011, 44(5): 760–774
- [52] Jern M, Rogstadius J, Astrom T. Treemaps and choropleth maps applied to regional hierarchical statistical data [C] // Proceedings of International Conference on Information Visualisation. Los Alamitos: IEEE Computer Society Press, 2009: 403–410
- [53] Kan Z Y, Hu C Z, Wang Z G, et al. NetVis: a network security management visualization tool based on treemap [C] //Proceedings of the 2nd International Conference on Advanced Computer Control. Los Alamitos: IEEE Computer Society Press, 2010: 18–21
- [54] Clarkson E, Desai K, Foley J. ResultMaps: visualization for search interfaces [J]. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, 2009, 15(6): 1057–1064
- [55] Wang C, Shen H W. LOD map—a visual interface for navigating multiresolution volume visualization [J]. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, 2006, 12(5): 1029–1036
- [56] Marson F, Musse S R. Automatic real-time generation of floor plans based on squarified treemaps algorithm [J]. International Journal of Computer Games Technology, 2010, 2010: Article No. 7
- [57] Tak S, Cockburn A. Improved window switching interfaces [C] //Proceedings of the 28th International Conference Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems. New York: ACM Press, 2010: 2915–2918
- [58] Gu Jiantao, Zhou Zhe, Tong Yuxia. Analysis and experiment of bidirectional squarified algorithm based on tree map method [J]. Computer Applications and Software, 2009, 26(9): 92–95 (in Chinese)  
(谷建涛, 周哲, 佟玉霞. 基于树图双向正方化算法的实验研究[J]. 计算机应用与软件, 2009, 26(9): 92–95)
- [59] Wang Weixin, Ming Chunying, Wang Hongan, et al. Visualization of hierarchical information based on Venn diagrams [J]. Chinese Journal of Computers, 2007, 30(9): 1632–1637 (in Chinese)  
(王威信, 明春英, 王宏安, 等. 基于Venn图的层次信息可视化[J]. 计算机学报, 2007, 30(9): 1632–1637)
- [60] Jing Minchang, Sun Jieli. Study on methods of large hierarchical information visualization [J]. Information Science, 2008, 26(4): 541–545 (in Chinese)  
(景民昌, 孙洁丽. 大型层次信息可视化方法研究[J]. 情报科学, 2008, 26(4): 541–545)
- [61] Ren Lei, Wang Weixin, Teng Dongxing, et al. Fisheye view for visualization of large tree by packing nested circles [J]. Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics, 2008, 20(3): 298–303, 309 (in Chinese)  
(任磊, 王威信, 滕东兴, 等. 面向海量层次信息可视化的嵌套圆鱼眼视图[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2008, 20(3): 298–303+309)