

## 面向层次化数据的变分圆形树图\*

赵海森, 吕琳, 薄志涛

(山东大学 计算机科学与技术学院, 山东 济南 250101)

通讯作者: 吕琳, E-mail: lulin.linda@gmail.com



**摘要:** 圆形树图(circular treemap)是面向层次化数据的一种信息可视化方法.提出一种圆形树图构造方法,将圆形树图的布局问题与组合优化中的圆排列(disk packing)问题相结合,以一种基于变分连续优化的算法求解多个半径不同圆的优化布局,由此提高圆形树图的空间利用率,并支持层次下行、层次上行与焦点+上下文等自然交互方式.实验结果表明了该方法的有效性.

**关键词:** 层次化数据可视化;圆形树图;变分圆形树图

**中图法分类号:** TP311

中文引用格式: 赵海森,吕琳,薄志涛.面向层次化数据的变分圆形树图.软件学报,2016,27(5):1103-1113. <http://www.jos.org.cn/1000-9825/4952.htm>

英文引用格式: Zhao HS, Lü L, Bo ZT. Variational circular treemaps for hierarchical data. Ruan Jian Xue Bao/Journal of Software, 2016, 27(5): 1103-1113 (in Chinese). <http://www.jos.org.cn/1000-9825/4952.htm>

### Variational Circular Treemaps for Hierarchical Data

ZHAO Hai-Sen, LÜ Lin, BO Zhi-Tao

(School of Computer Science and Technology, Shandong University, Ji'nan 250101, China)

**Abstract:** Circular treemaps provide an efficient approach for visualization of hierarchical data. This article presents variational circular treemaps with a layout algorithm by solving disk packing as a continuous optimization problem. Compared with the traditional circular treemaps, variational circular treemaps can achieve a higher space utilization ratio, and support natural interactions for data navigation, including focus+context distortions and drill-down and roll-up operations. Experimental results show the effectiveness of the presented method for visualization and interaction.

**Key words:** hierarchical data visualization; circular treemap; variational circular treemap

层次化数据是一种常见的数据类型,比如计算机文件系统、组织结构、生物分类信息等.层次化数据的可视化一直是信息可视化领域的重要研究内容<sup>[1-3]</sup>,相关工作主要分为两类:采用显式(explicit)表达的节点连接图(node-link diagrams)和采用隐式(implicit)表达的空间划分方法(space-filling methods)<sup>[4]</sup>.一般而言,节点连接图将节点间的父子关系显式地表示为直线、弧线或者曲线,能够清晰地展现节点间的上下级关系.但其空间利用率一般较低,难以进行大规模层次化数据的可视化<sup>[5]</sup>.以树图<sup>[6]</sup>及其变种<sup>[7-10]</sup>为代表的空间划分方法使用具有一定面积或体积的块或体来表示数据中的个体节点,并以这些块或体在空间上的包含关系来表示节点间的上下级关系.与节点连接图相比,空间划分方法能够很好地利用可视空间,便于处理大规模的层次化数据.但它们一般将大部分空间用于叶子节点的呈现,导致非叶子节点间的上下级或相邻关系难以识别<sup>[11]</sup>.

为了结合上述两类方法的优势,研究者们提出了一些改进方案,如,将节点连接图和空间划分相结合的方

\* 基金项目: 国家自然科学基金(61572291, 61202147); 山东省自然科学基金(ZR2012FQ026)

Foundation item: National Natural Science Foundation of China (61572291, 61202147); Natural Science Foundation of Shandong Province of China (ZR2012FQ026)

收稿时间: 2015-06-20; 修改时间: 2015-09-19, 2015-11-09; 采用时间: 2015-12-28

法<sup>[12-15]</sup>、将数据节点表示成圆的圆形树图方法<sup>[16]</sup>等.其中,圆形树图方法具有空间利用率较高,并清晰呈现节点间层次结构的优点,得到了极大的重视.但现有的圆形树图生成方法采用启发式的布局算法,空间利用率不是很好<sup>[17]</sup>,并且其布局一旦完成,则很难进行局部的动态调整,限制了数据的动态更新及交互可视化处理.

本文提出一种新的圆形树图生成方法,该方法以一种变分圆排列算法进行圆的布局优化.与传统方法相比,新方法有更高的空间利用率,能够更清晰地展示节点间的层次结构.特别是,新方法的布局算法易于对当前的布局进行动态调整,由此可方便地支持层次下行、层次上行与焦点+上下文等自然交互方式.新方法在生物分类数据上的应用实践表明了其有效性,一个实例如图 1 所示(有 6 层数据、2 516 个节点,右下角图例表示层数).

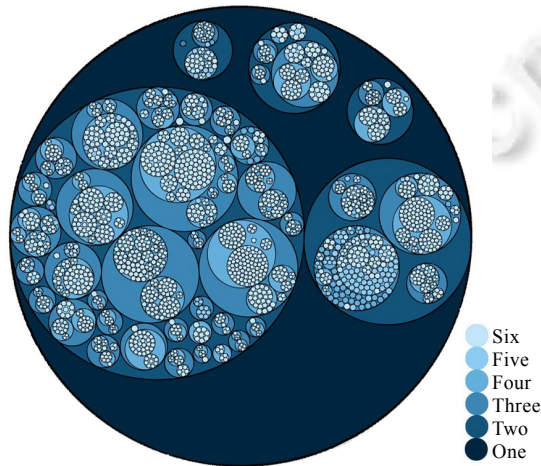


Fig.1 Variational circular treemaps for the biological taxonomic dataset

图 1 生物分类数据的变分圆形树图表示

## 1 相关工作

### • 矩形树图

矩形树图是一种经典的空间划分方法<sup>[6]</sup>,以矩形嵌套的形式对一个矩形区域进行递归划分.划分后的每个矩形区域表示一个数据节点,其子区域对应于其子节点.矩形树图空间利用率高,易于理解与实现.但它有以下缺点:容易产生狭长矩形,导致划分区域纵横比(aspect ratio)不一;只能对矩形区域进行划分,不适用于其他形状区域;叶节点的显示占用了大部分空间,导致非叶节点之间的层次结构表现不清晰.为了克服矩形树图的这些缺点,已有多种改进策略.Bruls 等人提出正方化树图(squarified treemap),用接近正方形的矩形代替狭长矩形的方法改进划分区域纵横比不一的状况<sup>[18]</sup>.Bederson 等人进一步提出了有序树图,以改进正方化树图的布局顺序<sup>[19]</sup>.Itoh 等人提出了两种基于 Delaunay 三角网格的矩形排列算法,改善了纵横比不一的情况<sup>[20]</sup>.Balzer 等人提出了 Voronoi 树图,引入 Voronoi 图进行空间分割<sup>[21]</sup>.Voronoi 树图能够对任意形状区域进行划分,有较高的空间利用率和较统一的划分区域纵横比,但其层次结构仍较难清晰地呈现.Jarke 等人提出了 Cushion 树图,对不同划分区域设置不同的明暗阴影,以强化层次结构的表现<sup>[9]</sup>.Hilbert/Moore 树图通过“漂移定位”度量(location drift metric)来提高空间分布稳定性<sup>[8]</sup>.关于这些方法的详细情况,请参考综述文章<sup>[2,22,23]</sup>和网站<sup>[24]</sup>.

### • 圆形树图

圆形树图或称为卵石图(pebble map)<sup>[16]</sup>,是由 Wetzel 首次提出的一种空间划分类层次化数据可视化方法.该方法用圆表示层次化数据的节点,将数据节点的值映射为对应圆的面积大小.最外围的圆表示根节点,下层节点的圆置于上层节点的圆内.与传统树图相比,圆形树图具有以下优点:各划分区域保持一致的纵横比;能够清晰地呈现节点间的层次结构;便于特定节点圆的选择操作,因为圆与圆之间的空白区域为用户提供了足够的交互空间.目前,已有很多圆形树图的实际应用,比如,一种圆形树图的变种 CropCircles 已应用于网页本体(Web

ontologies)的交互可视化<sup>[25]</sup>,Fischer 等人将圆形树图与一种圆形符号相结合以表示层次化时序数据<sup>[26]</sup>.对于圆形树图的布局,Wang 等人提出了一种启发式的圆布局算法<sup>[17]</sup>.该方法简单且易于实现,但不能保证最优的空间利用率,且很难对已完成的布局进行局部调整,因此无法支持焦点+上下文等自然交互操作.任磊等人提出了圆形树图的焦点+上下文交互方法<sup>[27]</sup>,通过对圆心进行三角网格剖分,并跟踪网格邻居的方法来保证变形前后的上下文一致性,然而其布局的空间利用率仍然不是很高.

本文提出的变分圆形树图具有圆形树图的固有优势,同时,基于变分优化的布局算法,能够显著提高空间利用率,可在任意形状显示区域内进行布局,并支持焦点+上下文等自然交互操作.

## 2 树图生成算法

变分圆形树图的算法概图如图 2 所示.用户可指定圆形或者任意多边形作为显示区域,用于表示层次化数据的根节点,其他节点用圆表示.各非叶节点通过变分圆排列方法对其孩子节点进行优化布局,在此,各孩子节点可以具有不同的权重值,权重值反映这些孩子节点对应的圆在该节点的圆内的面积比例.层次化数据的每个节点往往关联一组节点属性,这些属性可根据应用需求进行组合以进行权重赋值,或直接由用户交互地进行权重赋值.为每个节点的权重赋值后,再对同一父节点的兄弟节点的权重进行归一化处理(本文中假定同一层兄弟节点是无序的).

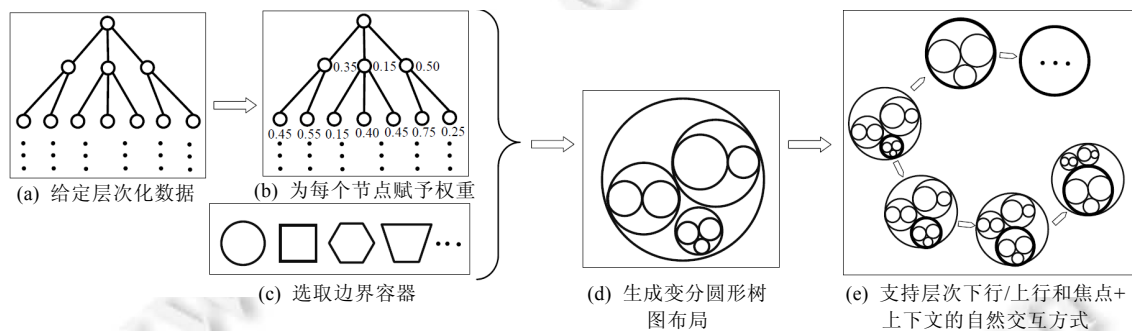


Fig.2 An overview of our framework

图 2 框架概览

在完成各节点权重赋值后,布局算法从根节点开始以广度优先的方式递归地处理各个层次节点的圆的布局.在此,同一父节点的兄弟节点在其父节点的圆内进行它们对应的圆的最大化,并且相互之间不重合,以尽可能地提高空间利用率,详见第 2.1 节.如图 3 所示,变分圆形树图采用嵌套圆的方式表示层次化数据的各节点,保持了传统圆形树图的优点.同时,该树图中不同层之间留有一定的空隙,便于清晰地表达层次结构,也为用户交互提供了较大的空间,便于拾取选择操作.

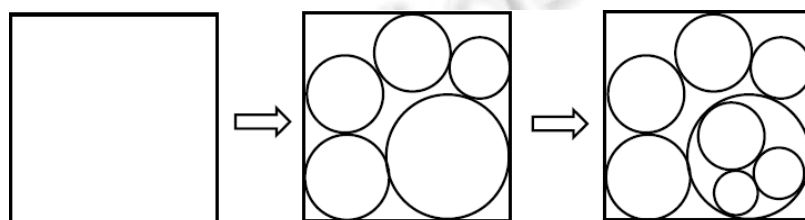


Fig.3 Variational circular treemaps layout algorithm

图 3 变分圆形树图布局算法

## 2.1 同层节点对应圆的布局算法

同一父节点下各兄弟节点的对应圆的布局,实质上是一个圆排列问题.这是一个典型的组合优化问题,可以描述为:在给定大小的圆形或任意多边形区域中,如何分布一组给定大小比例的圆,使得这组圆在给定区域中的总面积最大,并且互不重叠.

假设给定区域 $\Omega \in R^2$ 和半径为 $\{r_i\}_{i=1}^n > 0$ 的一组圆 $\{C_i\}_{i=1}^n$ .为所有的圆 $\{C_i\}_{i=1}^n$ 引入统一的缩放因子 $k \in R^+$ ,使 $C_i$ 变为 $kC_i$ .这样,在区域 $\Omega$ 中对圆 $\{C_i\}_{i=1}^n$ 进行圆排列布局问题可表示为以下最优化问题:

目标:Maximize  $k$

约束: $kC_i \subseteq \Omega, i \in \{1, \dots, n\}$

$$kC_i \cap kC_j = \emptyset, i, j \in \{1, \dots, n\}, i \neq j$$

在此,圆 $\{C_i\}_{i=1}^n$ 在区域 $\Omega$ 中的一个排列可表示为 $\{x_i\}_{i=1}^n$ ,其中 $x_i$ 是 $C_i$ 的圆心坐标.这样,上述优化问题的第2条约束可以改写为 $\|x_i - x_j\| - kr_i - kr_j \geq 0$ .

本文基于 Aurenhammer<sup>[28]</sup>提出的能量图(power diagram)处理上述圆布局问题.对于一个区域 $\Omega \in R^2$ 以及一组带权重的站点(site),其能量图是区域 $\Omega$ 中关于这些站点的一个空间划分,保证每个站点对应的单元 $\Omega_i$ 中的点到该站点的能量距离(power distance)比其他任何站点的距离都要小.因此在 $R^2$ 空间中,我们将圆心为 $x_i$ 、半径为 $r_i$ 的圆对应于权重为 $w_i = r_i^2$ 、位置为 $x_i$ 的能量图站点,即可生成一个能量图.在能量图的各个分区中内嵌一个最大内接圆,即可完成兄弟节点在其父节点的圆内的圆形布局.

本文提出的变分圆排列算法类似于计算 CVT(centroidal voronoi tessellation)<sup>[29]</sup>采用的 Lloyd 方法<sup>[30]</sup>,即,迭代地更新能量图并增大缩放因子 $k$ ,直至达到最优化的要求,算法停止,输出各圆的位置,并将此时的 $k$ 值作为所有圆的缩放因子.为保证各个分区单元中最大内接圆的唯一性,若某些单元 $\Omega_i$ 中有平行边的情况,比如对于一个矩形区域 $\Omega_i$ ,它有无数多个最大内接圆,本文则随机地确定一个最大内接圆.具体算法的伪代码见算法1.

**算法 1.** 变分圆排列算法.

输入:区域 $\Omega \in R^2$ ,权重为 $\{w_i\}_{i=1}^n$ 的节点圆 $\{C_i\}_{i=1}^n$ ,缩放因子 $k \in R^+$ ,初始圆排列 $\{x_i\}_{i=1}^n$ .

输出: $\{x_i\}_{i=1}^n$ 和 $k$ .

步骤:

1. 对于圆排列 $\{x_i\}_{i=1}^n$ ,构造 $\Omega$ 中 $\{kC_i\}_{i=1}^n$ 对应的封闭能量图 $\{\Omega_i\}_{i=1}^n$ .
2. 为每个单元 $\Omega_i$ 计算其最大内接圆 $\tilde{C}_i$ , $\tilde{C}_i$ 圆心为 $\tilde{x}_i$ , $\tilde{C}_i$ 半径为 $\tilde{r}_i = \max_{q \in \Omega} \min_{p \in \partial \Omega} \|p - q\|$ .此处的 $\partial \Omega_i$ 表示 $\Omega_i$ 的边界.
3. 令 $k' \leftarrow k, k \leftarrow \min\{\tilde{r}_i / \sqrt{w_i}\}$ .
4. 如果 $(k' - k)/k \leq \varepsilon$ ,则转到步骤5;否则,令 $x_i \leftarrow \tilde{x}_i, i = 1, 2, \dots, n$ ,转到步骤1.
5. 结束,输出当前 $\{x_i\}_{i=1}^n$ 和 $k$ .

作为算法1的初始输入,缩放因子 $k$ 以及初始的圆排列 $\{x_i\}_{i=1}^n$ 都在算法初始时给定.初始缩放因子 $k$ 根据给定区域 $\Omega$ 的大小设定一个足够小的值.对于圆形边界,我们通常先将其转换为半径为1的单位圆,然后把 $k$ 设为 $10^{-6} / \max_i \{w_i\}$ .对于初始圆排列 $\{x_i\}_{i=1}^n$ ,采用随机放置的方式设定.

在算法的迭代过程中,每次迭代都重新计算当前的能量图,使得缩放因子 $k$ 越来越大,并更新当前的圆布局.当 $k$ 值不再增加时,算法终止.步骤4中的阈值 $\varepsilon$ 用于终止判断.通常不需要把阈值 $\varepsilon$ 设置得非常小,以较好地平衡算法执行效率和质量,并可以防止 $k$ 非常接近阈值的时候出现过度迭代的现象.在实现中,我们一般将 $\varepsilon$ 设为 $10^{-3}$ .图4示意了该算法的迭代过程(虚线表示能量图).

值得注意的是,圆布局问题已被证明是一个 NP-hard 问题<sup>[31]</sup>,算法1提出的优化过程只能达到局部最优,并不能达到全局最优.关于本算法更详细的技术细节,参见文献[32].

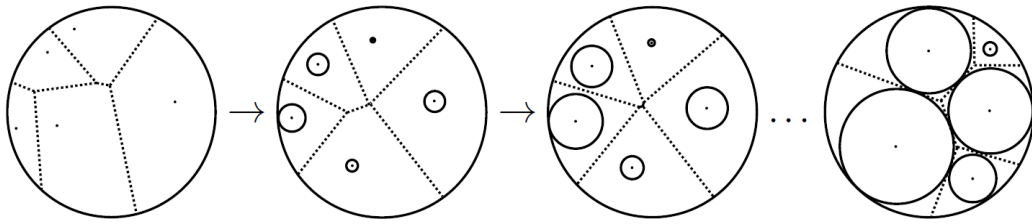


Fig.4 Disk packing process for five nodes in one level  
图4 同层5个节点的圆排列过程

### 3 交互方法

在圆形树图中,随着深度和节点数目的增加,用于表示深层节点的区域会越来越小,导致它们难以辨认.为此,我们提出两种交互技术,以使所关注的节点得到放大呈现,便于用户观察深层节点.这两种交互技术,一种是焦点+上下文交互技术,或称为鱼眼视图效果;另一种是层次下行、上行操作.

#### 3.1 焦点与上下文

在焦点与上下文交互中,首先选取特定焦点区域,之后在保持上下文的前提下逐步增大焦点区域的范围.在圆形树图中,通过点击上下层圆之间的空隙,可以方便地选取特定节点圆作为焦点与上下文交互中的焦点圆.然后,交互过程中的鱼眼视图变形效果,按以下方式实现:逐步增大焦点圆的权重值,并保持其兄弟节点的权重值不变;随后调用第2.1节的布局算法1对该层节点进行圆形布局.

由于变分圆形树图各节点具有统一的纵横比,只需对焦点圆所在层的节点圆进行重新布局,即可将变形效果自然地传递到子层视图.在此,使用堆栈记录鱼眼变形过程,可以很容易地实现回溯变形.图5给出了一个鱼眼变形的实例(焦点圆用粗黑线突出显示).

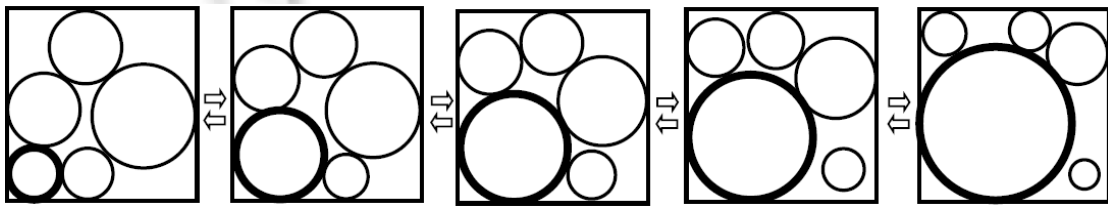


Fig.5 Demo of fisheye distortions  
图5 鱼眼变形样例

为了实现鱼眼视图变形,将用户指定的焦点圆  $C_j$  的权重由初始权重  $w_j$  逐步增大到目标权重  $w_t$ ,我们引入一个参数  $\varphi$  用于描述视图变形程度,定义为  $\varphi = w_t / (1 - w_j + w_t)$ ,  $w_j \leq \varphi < 1$ ,即,焦点圆权重增大到目标权重后,其对应圆相对其父节点的圆的面积比例.这样,在用户指定参数  $\varphi$  以后,目标  $w_t$  可由此公式计算得到.具体实现情况,见算法2.

#### 算法2. 鱼眼视图变形算法.

输入:在区域  $\Omega$  中,权重值为  $\{w_i\}_{i=1}^n$  的节点圆  $\{C_i\}_{i=1}^n$  的合法圆排列为  $\{x_i\}_{i=1}^n$ ;焦点圆  $C_j$  的权重为  $w_j$ ;变形参数  $\varphi$  和目标权重  $w_t = \varphi(1 - w_j) / (1 - \varphi)$ ;权重递增步长  $\mathcal{G}$ ;空堆栈  $S$ .

- 鱼眼变形过程

  1. 将节点圆  $\{C_i\}_{i=1}^n$  当前圆排列压入堆栈  $S$ .
  2. 如果  $w_j > w_t$ ,则返回.
  3.  $w_j \leftarrow (1 + \mathcal{G})w_j$ .
  4. 调用算法1对节点圆  $\{C_i\}_{i=1}^n$  进行布局.



5. 显示当前布局,转至步骤 1.
  - 回溯变形过程
1. 若堆栈  $S$  为空,则返回.
2. 弹出堆栈  $S$  栈顶元素  $H$ .
3. 显示栈顶元素  $H$  对应的布局,转至步骤 1.

需要注意的是:参数  $\phi$  由用户指定,取值范围为  $[w_j, 1)$ .图 5 中,参数  $\phi$  取值为 0.8.参数  $\theta$  用于描述焦点圆在每次迭代中权重增大的比例,这里的取值是 0.01.

### 3.2 层次下行/上行

变分圆形树图中的层次下行/上行可实现视图在不同层次之间的切换.由于该树图中各节点具有统一的纵横比,并且不同层之间留有一定的空隙,因此可以非常容易地完成对某层视图节点的选择操作.图 6 给出了一个层次下行/上行的实例(焦点圆用粗黑线突出显示),在此,最上层视图中并没有显示所有的深层视图,用户可以在层间切换过程中查看更多的深层视图.

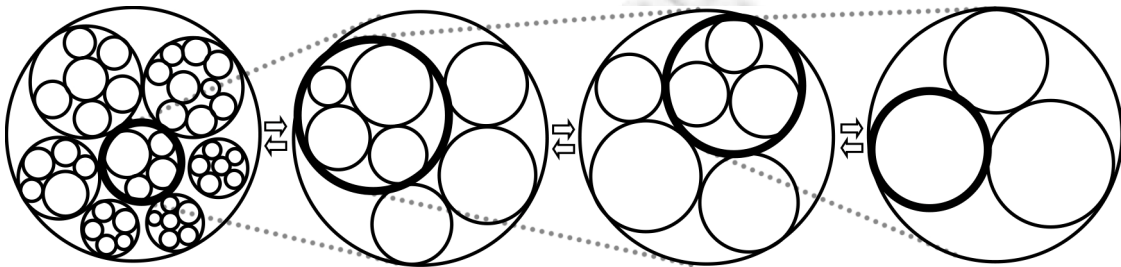


Fig.6 Demo of drill-down & roll up

图 6 层次下行/上行样例

## 4 结果与讨论

本节将变分圆形树图应用于生物分类数据的可视化中,以验证本方法的有效性.实验用数据集来自于生物大百科全书(EOL)<sup>[33]</sup>和综合分类学信息系统(ITIS)<sup>[34]</sup>.EOL 是一个以收集生物信息为目的的开放 Wiki 平台,已有 130 万个条目信息.ITIS 按照 Linnaean 分类法将 EOL 生物信息分为 9 层,分别为 Kingdom,Phylum,Class,Order,Superfamily,Family,Fenus,Species 和 Intraspecies.

本文算法用 C++ 语言实现,主要调用了 CGAL<sup>[35]</sup>用于计算能量图.

实验中尝试了多种节点权重值计算方式,如孩子节点的数目、孩子叶节点的数目、节点的深度等.实验中发现,孩子节点的数目作为权重从美学角度来讲是一个较好的选择.为每个节点确定权重后,我们归一化处理共享同一父节点的兄弟节点的权值.以生物分类数据的第 2 层 Kingdom 层为例,所有的生物类别在本层分为 5 个节点,归一化后的权重值分别为 Animalia( $w=0.686$ ),Monera( $w=0.058$ ),Plantae( $w=0.098$ ),Fungi( $w=0.079$ )及 Protozoa( $w=0.079$ ).

变分圆形树图对生物分类数据可视化的整体视图见后文图 10(d).实验中,计算第 2 层 5 个节点的布局花费时间 0.14s,第 3 层 51 个节点花费时间 0.73s,第 4 层 170 个节点花费时间 3.44s,第 5 层 487 个节点花费时间 8.78s,第 6 层 1 803 个节点花费时间 20.17s;对所有 2 516 个节点进行布局共花费 33.26s.上述实验数据是从一台 CPU 主频为 3.10GHz 的台式机上测试得到的.

本方法与传统圆形树图相比在空间利用率方面具有明显优势.图 7 比较了本方法和传统圆形树图方法对同一个数据节点可视化的效果(取自 kingdom Fungi 的 Ascomycota,共 43 个孩子节点).对于生物分类数据的前 6 层圆布局,我们计算了该层圆面积总和与根节点对应区域面积的比值,见表 1.其中,第 2 列和第 3 列分别给出了传统圆形树图方法和本方法的比值,最后一列给出了本方法相对于传统圆形树图的改进幅度.

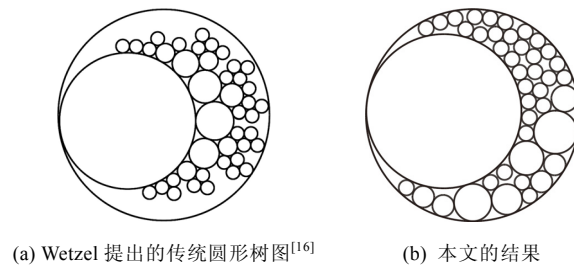


Fig.7 Comparison with one level data

图 7 一层数据节点的比较

**Table 1** Comparisons on the space utilization ratios between the original circular treemaps and our method

**表 1** 传统圆形树图和本文方法的空间利用率的比较

层次	传统方法	本文方法	提高(%)
2	0.614 3	0.614 3	0
3	0.421 2	0.479 0	14
4	0.275 2	0.322 1	17
5	0.180 5	0.226 7	26
6	0.105 0	0.156 2	49

图 8 和图 9(焦点圆用粗黑线突出显示)分别给出了层次下行/上行和焦点+上下文交互的过程.

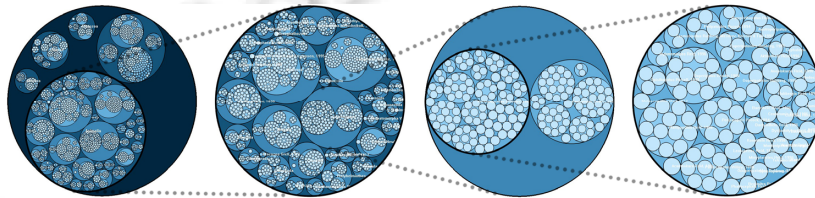


Fig.8 A drill-down & roll-up process

图 8 层次下行/上行操作

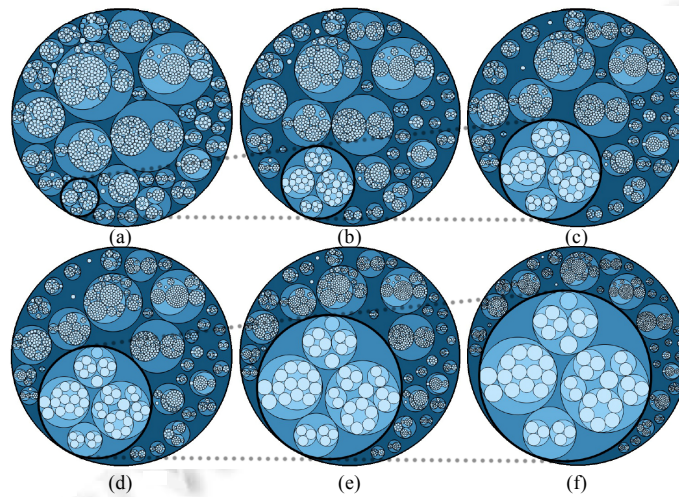


Fig.9 A fisheye process to focus on the Arthropoda in Animalia

图 9 鱼眼效果应用于动物门的节肢动物门

在图 8 中,最左边的视图为生物分类数据最上层视图,用户可以采用层次下行/上行的交互方式逐步查看 Animalia, Onychophora 以及 Peripatopsidae Bouvier 1907 层次的视图.

图 9 给出了对 Animalia 节点中对 Arthropoda 节点进行细节查看的鱼眼视图变形效果.在变形过程中,我们能够保持变形的平滑过度,并且保持兄弟节点圆的相对位置关系和相对大小比例关系.

本方法也与经典正方化树图、加权能量 Voronoi 树图以及传统的圆形树图进行了比较.图 10 中给出了生物分类数据应用 4 种方法进行可视化的结果比较.为公平起见,采用统一的颜色编码方式与节点权重值计算方式,即利用所包含叶子节点的个数定义节点权重.由对比结果可知,与另外两种树图方法相比,两种圆形树图方法能够清晰地显示生物分类数据的层次结构,因为正方化树图和加权能量 Voronoi 树图几乎将所有的空间用于表示叶子节点,不便于层次结构的辨识.此外,本文方法与传统的圆形树图相比,空间利用率更高.实际应用中,本文方法中的颜色编码也可以选择其他方式,比如,可以用颜色来表示节点深度等,以获得更好的视觉效果.

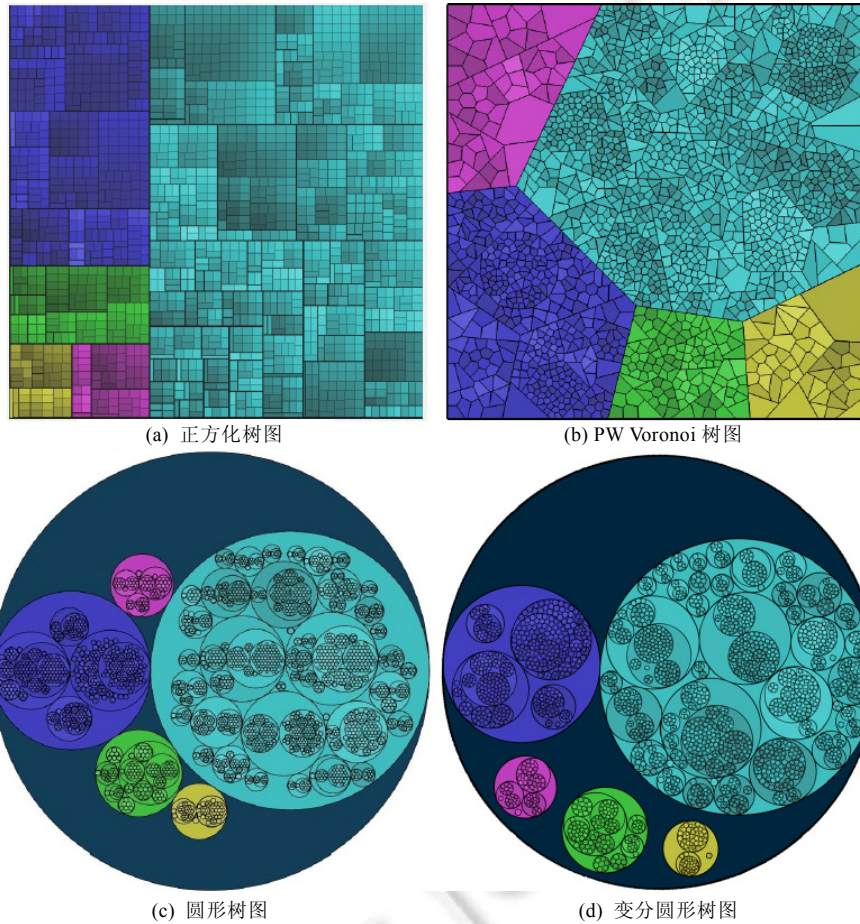


Fig.10 Comparison with the squarified treemaps, PW Voronoi treemaps, original circular treemaps, and variational circular treemaps for the EOL data

图 10 正方化树图、PW Voronoi 树图、圆形树图和变分圆形树图应用于 EOL 数据集的比较

变分圆形树图对于边界的形状并无要求,可非常自然地生成圆形树图与 Voronoi 树图的混合树图,如图 11 所示,其中包含 5 层 1 706 个节点的数据.



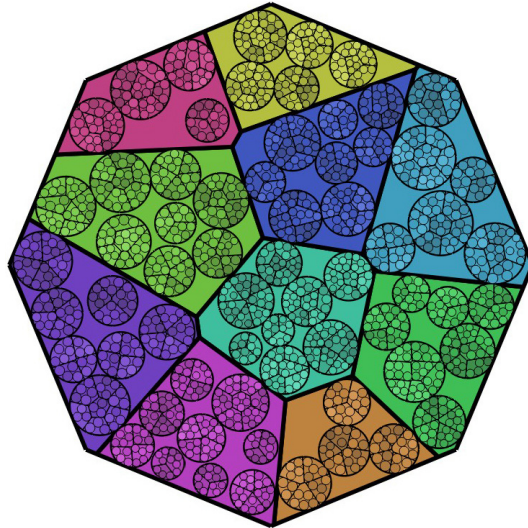


Fig.11 A hybrid of variational circular treemaps and Voronoi treemaps  
图 11 变分圆形树图与 Voronoi 树图的混合形式

## 5 结 论

本文提出的变分圆树形图生成方法将求解多个半径不同的圆的布局问题与组合优化中的圆排列问题相结合,显著改善了圆形树图的空间利用率.该方法除了能够更清晰地展示层次结构以外,还便于进行层次下行、层次上行与焦点+上下文等自然交互的可视化处理.新方法易于实现,计算快捷,便于进行拾取选择操作,在多点触控桌面平台上有很大的应用潜力.

### References:

- [1] Holten D. Hierarchical edge bundles: Visualization of adjacency relations in hierarchical data. *IEEE Trans. on Visualization and Computer Graphics*, 2006,12(5):741–748. [doi: 10.1109/TVCG.2006.147]
- [2] Schulz HJ. Treevis.net: A tree visualization reference. *IEEE Computer Graphics and Applications*, 2011,31(6):11–15. [doi: 10.1109/MCG.2011.103]
- [3] Stolte C, Tang D, Hanrahan P. Query, analysis, and visualization of hierarchically structured data using Polaris. In: *Proc. of the 8th ACM SIGKDD Int'l Conf. on Knowledge Discovery and Data Mining (KDD 2002)*. New York: ACM Press, 2002. 112–122. [doi: 10.1145/775047.775064]
- [4] Schulz HJ, Schumann H. Visualizing graphs—A generalized view. In: *Proc. of the Conf. on Information Visualization (IV 2006)*. Washington: IEEE Computer Society, 2006. 166–173. [doi: 10.1109/IV.2006.130]
- [5] Johnson B, Shneiderman B. Tree-Maps: A space-filling approach to the visualization of hierarchical information structures. In: Nielson GM, Rosenblum L, eds. *Proc. of the 2nd Conf. on Visualization (VIS'91)*. Los Alamitos: IEEE Computer Society Press, 1991. 284–291. [doi: 10.1109/VISUAL.1991.175815]
- [6] Shneiderman B. Tree visualization with tree-maps: 2-d space-filling approach. *ACM Trans. on Graphics*, 1992,11(1):92–99. [doi: 10.1145/102377.115768]
- [7] Lam HC, Dinov ID. Hyperbolic wheel: A novel hyperbolic space graph viewer for hierarchical information content. *ISRN Computer Graphics*, 2012,2012:Article ID 609234. [doi: 10.5402/2012/609234]
- [8] Tak S, Cockburn A. Enhanced spatial stability with hilbert and Moore treemaps. *IEEE Trans. on Visualization and Computer Graphics*, 2013,19(1):141–148. [doi: 10.1109/TVCG.2012.108]
- [9] Van Wijk JJ, van de Wetering H. Cushion treemaps: Visualization of hierarchical information. In: *Proc. of the 1999 IEEE Symp. on Information Visualization (INFOVIS'99)*. Washington: IEEE Computer Society, 1999. 73–78. [doi: 10.1109/INFVIS.1999.801860]

- [10] Wattenberg M. A note on space-filling visualizations and space-filling curves. In: Proc. of the IEEE Symp. on Information Visualization (INFOVIS 2005). 2005. 181–186. [doi: 10.1109/INFVIS.2005.1532145]
- [11] van Ham F, van Wijk JJ. Beamtrees: Compact visualization of large hierarchies. *Information Visualization*, 2003,2(1):31–39.
- [12] Linsen L, Behrendt S. Linked treemap: A 3D treemap node link layout for visualizing hierarchical structures. *Computational Statistics*, 2011,26(4):679–697. [doi: 10.1007/s00180-011-0272-2]
- [13] Nguyen QV, Huang ML. Space-Optimized tree: A connection+enclosure approach for the visualization of large hierarchies. *Information Visualization*, 2003,2(1):3–15. [doi: 10.1057/palgrave.ivs.9500031]
- [14] Zhao S, McGuffin MJ, Chignell MH. Elastic hierarchies: Combining treemaps and node-link diagrams. In: Proc. of the IEEE Symp. on Information Visualization (INFOVIS 2005). IEEE, 2005. 57–64. [doi: 10.1109/INFVIS.2005.1532129]
- [15] Chen Y, Zhang XY, Feng YC, Liang J, Chen HQ. Sunburst with ordered nodes based on hierarchical clustering: A visual analyzing method for associated hierarchical pesticide residue data. *Journal of Visualization*, 2015,18(2):237–254. [doi: 10.1007/s12650-014-0269-3]
- [16] Wetzel K. Pebbles—Using circular treemaps to visualize disk usage. <http://lip.sourceforge.net/ctreemap.html>
- [17] Wang W, Wang H, Dai G, Wang H. Visualization of large hierarchical data by circle packing. In: Proc. of the SIGCHI Conf. on Human Factors in Computing Systems (CHI 2006). New York: ACM Press, 2006. 517–520. [doi: 10.1145/1124772.1124851]
- [18] Bruls M, Huizing K, van Wijk JJ. Squarified treemaps. In: Proc. of the Joint Eurographics and IEEE TCVG Symp. on Visualization (TCVG 2000). IEEE Press, 2000. 33–42. [doi: 10.1007/978-3-7091-6783-0\_4]
- [19] Bederson BB, Shneiderman B, Wattenberg M. Ordered and quantum treemaps: Making effective use of 2D space to display hierarchies. *ACM Trans. on Graphics (TOG)*, 2002,21(4):833–854. [doi: 10.1145/571647.571649]
- [20] Itoh T, Yamaguchi Y, Ikehata Y, Kajinaga Y. Hierarchical data visualization using a fast rectangle-packing algorithm. *IEEE Trans. on Visualization and Computer Graphics*, 2004,10(3):302–313. [doi: 10.1109/TVCG.2004.1272729]
- [21] Balzer M, Deussen O. Voronoi treemaps. In: Proc. of the 2005 IEEE Symp. on Information Visualization (INFOVIS 2005). Washington: IEEE Computer Society, 2005. 7–14. [doi: 10.1109/INFVIS.2005.1532128]
- [22] Schulz HJ, Hadlak S, Schumann H. The design space of implicit hierarchy visualization: A survey. *IEEE Trans. on Visualization and Computer Graphics*, 2011,17(4):393–411. [doi: 10.1109/TVCG.2010.79]
- [23] Zhang X, Yuan XZ. Treemap visualization. *Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics*, 2012,24(9):1113–1124 (in Chinese with English abstract).
- [24] Shneiderman B. Treemaps for space-constrained visualization of hierarchies. <http://www.cs.umd.edu/hcil/treemap-history/>
- [25] Parsia B, Wang T, Golbeck J. Visualizing Web ontologies with cropcircles. In: Proc. of the 4th Int'l Semantic Web Conf. 2005. 6–10.
- [26] Fischer F, Fuchs J, Mansmann F. Clockmap: Enhancing circular treemaps with temporal glyphs for time-series data. In: Proc. of the Eurographics Conf. on Visualization (EuroVis). 2012. 97–101.
- [27] Ren L, Wang WX, Teng XD, Ma CX, Dai GZ, Wang HA. Focus+Context technique for interactive visualization of large hierarchies. *Ruan Jian Xue Bao/Journal of Software*, 2008,19(11):3073–3082 (in Chinese with English abstract). <http://www.jos.org.cn/1000-9825/19/3073.htm>
- [28] Aurenhammer F. Power diagrams: Properties, algorithms and applications. *SIAM Journal on Computing*, 1987,16(1):78–96. [doi: 10.1137/0216006]
- [29] Du Q, Faber V, Gunzburger M. Centroidal voronoi tessellations: Applications and algorithms. *SIAM Review*, 1999,41(4):637–676. [doi: 10.1137/S0036144599352836]
- [30] Lloyd SP. Least squares quantization in PCM. *IEEE Trans. on Information Theory*, 1982,28(2):129–136. [doi: 10.1109/TIT.1982.1056489]
- [31] Fowler RJ, Paterson M, Tanimoto SL. Optimal packing and covering in the plane are NP-complete. *Information Processing Letters*, 1981,12(3):133–137. [doi: 10.1016/0020-0190(81)90111-3]
- [32] Lu L, Choi YK, Sun F, Wang W. Variational circle packing based on power diagram. Technical Report, The University of Hong Kong, 2011.
- [33] Encyclopedia of life. <http://www.eol.org>

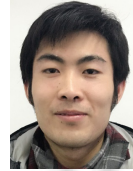
- [34] IT IS. Integrated taxonomic information system. <http://www.itis.gov>  
[35] CGAL. Computational geometry algorithms library. <http://www.cgal.org>

附中文参考文献:

- [23] 张昕,袁晓如. 树图可视化. 计算机辅助设计与图形学学报, 2012, 24(9): 1113-1124.  
[27] 任磊, 王威信, 滕东兴, 马翠霞, 戴国忠, 王宏安. 海量层次信息的 Focus+Context 交互式可视化技术. 软件学报, 2008, 19(11): 3073-3082. <http://www.jos.org.cn/1000-9825/19/3073.htm>



赵海森(1988-),男,山东聊城人,博士生, CCF 学生会员,主要研究领域为计算机图形学.



薄志涛(1992-),男,硕士生,CCF 学生会员,主要研究领域为计算机图形学.



吕琳(1981-),女,博士,副教授,CCF 高级会员,主要研究领域为计算机图形学,可视化.

www.jos.org.cn