



基于力导向模型的非一致节点群组布局 可视化算法研究*

曾新红^{1,2} 蔡庆河² 黄华军¹ 林伟明¹

¹(深圳大学图书馆 深圳 518060)

²(深圳大学计算机与软件学院 深圳 518060)

摘要:【目的】提出一种基于力导向模型的非一致节点群组布局算法,以实现直观、生动、美观的信息可视化布局。【方法】在追溯力导向算法与信息可视化的渊源的基础上,以电荷理论为突破口,借助群组和非一致节点的概念,提出这一算法。该算法利用分层布局思想,各布局单元独立布局,且采用相似但有区别的布局策略。【结果】利用此算法实现一款面向网络知识组织系统(NKOS)的可视化原型系统,可广泛应用于 NKOS(尤其是中文 NKOS)中概念实例的可视化展示。【局限】所提出的算法收敛条件效果还不够显著,以至于在布局过程中存在冗余节点抖动现象,今后可引入温度等神经计算的相关概念加以解决。【结论】发现一种将图结构结合语义信息转换为树结构,并结合群组概念,利用力导向算法解决其布局问题的方法。该算法可以很好地解决中文叙词表本体等 NKOS 的概念实例可视化问题,对画图社区解决其他类似问题也具有参考作用。

关键词: 信息可视化 力导向算法 非一致节点 群组布局 中文叙词表本体 网络知识组织系统

分类号: TP391.41 G254.29

1 引言

本体是共享概念模型的形式化规范说明^[1]。中文叙词表本体(OntoThesaurus)则是中文叙词表与本体相结合的产物,其因本体的形式化特性而能够为计算机所理解,并实现自动推理。此外,它又可以深化成更细粒度的本体^[2]。网络本体语言 OWL 是为便于 Web 上的本体开发与共享而设计的,旨在令 Web 上的内容能够更容易地被机器访问^[3]。中文叙词表本体共建共享系统 OTCSS 通过将中文叙词表 OWL 化,使传统的中文叙词表经由互联网,从图书情报界扩展为语义 Web

上中文本体与中文术语学的表示^[4],从而惠及更多受众。但是,目前的 OTCSS 依旧比较专业,非专业人士欲从中受益,仍存在快速认知上的障碍。因此,笔者希望通过对信息可视化的研究,为 OTCSS 实现叙词概念实例的可视化功能,为广大网络用户搭建一座通向概念理解的便捷桥梁。

本文是笔者前期研究^[5]的后续研究。前期已对知识组织系统可视化工具的国内外研究现状进行详细阐述。简言之,当前已有的此类可视化工具大部分专用于某种特定数据或系统,移植困难,且大都采用简单的几何图形表示概念及概念之间的关系,不同种类的

收稿日期: 2014-04-10

收修改稿日期: 2014-06-06

*本文系国家自然科学基金项目“中文知识组织系统形式化语义描述标准体系研究”(项目编号:12BTQ045)、广东省哲学社会科学“十一五”规划项目“中文知识组织系统形式化语义描述标准体系研究”(项目编号:GD10CTS02)和广东省自然科学基金团队项目“新型计算模式及其软件开发方法研究”(项目编号:10351806001000000)的研究成果之一。

关系混合展示,直观程度和美观程度有限,因此有必要针对中文 NKOS 的大众化应用开发新的可视化软件。笔者前期研究所提方案已基本能够解决中文 NKOS 的可视化问题,但在多群组情况下,其布局效果未能完美地符合预期。本文以追根溯源的态度,在全方位探讨力导向算法的基础上,尝试采用非一致节点的方法彻底解决群组间的布局问题。

2 国内外研究现状:信息可视化与基于力导向模型的画图算法

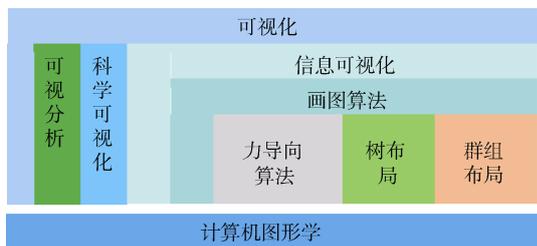


图1 可视化与力导向算法的关系示意图

图1以矩形图的形式说明力导向算法与可视化之间的关系。计算机图形学(Computer Graphics)是计算机科学的一个重要分支,利用计算机产生令人赏心悦目的具有真实感的图形是其题中之义。可视化则以计算机图形学为支撑,在信息与人类的认知系统间搭建一座桥梁,从而推动人类快速准确地理解信息。袁晓如等^[6]指出可视化发展的三个方向:科学可视化、信息可视化和可视分析。

作为一种抽象的数据结构,图在表达许多科学与工程应用的复杂概念结构上,有“一图抵万言”的作用,因此常被作为信息建模的工具^[7]。业界有不少图表示方案,但笔者倾向于选择:对于无向图以符号圆圈或者框来表示图的顶点,而以曲线、直线或者折线表示连接顶点的边,即节点-链接图(Node-Link)方案;至于有向图,边的替代符则用箭头表示。以约定的图表示方案所画出的某个图,称为图画(Drawing)。一个图的图画,往往不止一种。在用户看来,这些图画“好”与“坏”的评价标准,就是其可读性,即此图画迅速且清晰地传达其背后信息的能力,是通过美学(Aesthetics)度量的。任意两条边都不出现交叉的图画称为平面图(Planar)。画图算法(Graph Drawing Algorithm)就是接受图G(Graph)的描述,按照某种图表示方案,生成图画

的算法或者布局(Layout)策略^[8],是信息可视化的重要手段之一。平面上的图布局本质上是一个映射: $f:V \rightarrow R^2$,即将顶点放置在二维平面上,而平面图以及美学、算法效率等则构成评价算法优良的尺度。

在不同的应用场景中,美学原则可能不同,但Purchase^[9]总结了目前业内公认的一般美学原则:

(1) 最小化边交叉(Edge Crossing),即任意两条边交叉于一点的情况应尽量少发生;

(2) 最小化边弯曲(Edge Bend),即应尽量避免产生弯曲的边;

(3) 最大化对称性;

(4) 最大化角辨识度(Angle Resolution):在图中,如果某个顶点关联了至少两条边,那么由这些边所构成的最小夹角即称为该顶点的角辨识度。而图的角辨识度,则是指图中所有顶点的角辨识度的最小值。角辨识度的取值范围为 $[0^\circ, 180^\circ]$ 。显然,较大的角辨识度意味着顶点的各关联边“分”得较“开”;

(5) 宜边长一致(Uniform Edge Length),即图中所有边的长度差别应尽量小。

结合实际情况,在上述美学原则的基础上,笔者将新增一个美学原则:群组到角原则,详见3.1节。

图的布局策略有多种,诸如力导向布局、树布局、群组布局、光谱布局(Spectral Layout)等。其中,不同的布局方法并不是完全独立的,例如,在群组图中,也会存在力导向算法的身影^[10-11]。

此外,画图算法本身并不能克服或者完全克服信息可视化过程中的数据导航以及可读性等问题,信息的展示方式以及用户交互等辅助性的手段也十分重要。Herman等^[12]总结了用于导航或者与用户交互图算法布局结果的几种可视化技术,例如:移动缩放(Zoom and Pan)、鱼眼畸变(Fisheye Distortion)、焦点+上下文(Focus + Context)、增量浏览与导航(Incremental Exploration and Navigation)、聚簇(Clustering)等,此类技术与画图算法相结合,可以称为图可视化。

1963年,Tutte^[13]提出的质心法被公认为是第一个事实上的力导向算法。1984年,Eades^[14]提出了一种电荷弹簧模型,以带电环代替图的顶点,弹簧代替图的边,尝试用物理方法画图,从而开拓了力导向算法的新思路。该算法首先为图中各顶点赋予随机的初始位置,然后系统在电荷之间的斥力和弹簧的弹力作用下,

不停地运动,直至达到稳定平衡的状态。

Kobourov^[15]对电荷弹簧模型的演进过程进行梳理,笔者在此基础上结合相关研究^[16-19]进行总结,认为其主要呈现出以下特征:

(1) 调适力模型。从 Eades 的将各顶点视为带同种电荷的 Vertex-Vertex 型力模型,到基于模拟退火算法的 Vertex-Edge 型,再到从 Edge-Edge 角度探讨的力模型,再到“磁力-弹簧”模型,又到与图的最短路径理论相结合,其多样化特征明显。而 Lin 等^[16]和 Hachul 等^[20]从势场(Potential Fields)的角度解决画图问题。Duncan 等^[21]和 Chernobelskiy 等^[22]提出的 Lombardi 风格的画图算法无疑更验证了上述这一论断。

(2) 大规模化。传统的经典算法通常只能处理小规模(顶点数目至多为 50 个)的图,而能够处理成千上万顶点的大规模图的力导向布局算法的研究也已经出现。

(3) 布局空间多元化。画图算法的布局空间,涵盖了二维欧几里德几何空间、三维欧几里德几何空间,直至非欧几里德几何空间。Kobourov 等^[23]对此有更为详尽的总结和阐述。

(4) 更贴近实际应用。传统的画图算法只强调图本身结构的呈现,不关注图中顶点的大小和形状等物理属性。所以,在解决实践中的相关问题时,常导致所得图画与美学原则严重背离。因此,关于非一致节点的研究应运而生, Lin 等^[16]和 Harel 等^[17]得到有代表性的研究成果。

(5) 动态化。利用力导向算法潜在的“动”特性,人们开始以逻辑帧等方式,制造动态效果,以避免用户出现心理落差(Mental Gap),这种新布局策略称为动态画图(Dynamic Graph Drawing),包括动画序列已知的离线动态画图^[18]及与之相对应的联机动态画图^[19]。

本质上,力导向画图算法有两个关键点,即力模型公式和算法的结束条件,而在各种力模型中,力大体上可以划分为引力与斥力两种。

3 基于力导向模型的非一致节点群组布局算法

在现有国内外力导向算法研究成果的基础上,针对中文 NKOS 中概念实例可视化的具体需求,基于群组和非一致节点的概念提出完整的布局算法。

3.1 基本概念定义与美学标准

正如文献[5]所述,中文叙词表本体存在“叙词-关系名-关系词集合”的结构特性,即当前叙词的某种关系包含有多个关系词,例如《中分表》中的叙词“传声器”,其“related”关系,就包含有叙词“扩声系统”、“立体声录音机”、“振膜”等三个叙词。据此,前期研究^[5]中分别给出节点(Node)、概念节点(ConceptNode)、群组节点(ClusterNode)、子节点、群组节点的度(ChildNum)等概念。在本文中,相应地以 CoN(S)表示概念节点 S,以 CIN(S)表示群组节点 S,以 ChN(S)表示子节点 S,以 CN(CIN(S))表示群组节点 S 的度。此外,又引入了新的概念:一致节点和非一致节点^[16-17]。

(1) 一致节点:在实质上可以忽略形状和大小等物理属性的顶点称为一致节点,即无大小和形状,或者形状相同且大小一样,即节点具有“同一性”。一致节点可以被视为点。

(2) 非一致节点:在实质上不可以忽略形状和大小等物理属性的节点称为非一致节点。非一致节点的物理属性往往存在象征性的意义或者别有用,例如在节点中填充其属性信息等,这也是本文所主张的。

除第 2 节中所提及的美学原则之外,笔者将新加一个美学原则:群组到角原则。

群组到角指的是,在概念实例可视化后所形成的图画中, CIN(S)同与其相邻的 CIN(T)所形成的夹角用 $\angle CIN(S)_CIN(T)$ 表示,或简称为 $\angle N$,其中 N 为阿拉伯数字。对 CIN(T)而言,如果存在 CIN(S)与 CIN(S')与其相邻,那么就存在 $\angle CIN(S)_CIN(T)$ 和 $\angle CIN(S')_CIN(T)$ 关系,群组到角与 CN(CIN(S))和 CN(CIN(S'))呈正相关,即具有较大 ChildNum 的 ClusterNode 对应的群组到角较大。群组到角的意义在于能够有效地体现 ChildNum 对布局的影响。

图 2 为由文献[5]生成的以“非生产领域经济学”为概念叙词的布局图。就 CIN(族首词)而言,有 CIN(人口词)和 CIN(参见)与其相邻,并且 CN(CIN(人口词))为 2, CN(CIN(参见))为 1。根据群组到角美学要求,应有 $\angle 3 > \angle 4$ 存在。但此布局并不能体现出这一点。另一方面,当小幅度地移动 CIN(下位词)时, $\angle 1$ 和 $\angle 2$ 受影响都不大, ChildNum 在这里的影响就显得有限。事实上,这种问题的产生是由于此种调节策略不够精细。这也是促使笔者进行本文研究的动力之一。

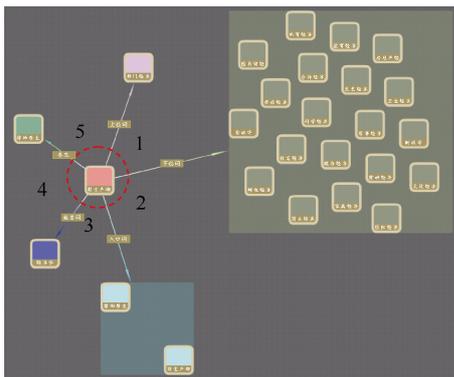


图2 叙词“非生产领域经济学”的布局^[5]

3.2 算法的基本思想

本算法的基本思想是分层布局：ClusterNode 与 ConceptNode 作为一个布局单元，ClusterNode 内部子节点作为一个布局单元。具体而言，算法流程为：首先给各节点初始化位置，然后分别按照各布局单元独立布局时的力学公式，计算其受力情况，并根据相应的节点移动策略，计算各节点的新位置，将各节点移动至新的位置。如此重复，如果某个布局单元满足布局终止条件，就终止该单元的布局，直至所有布局单元都满足终止条件时，本算法结束。

算法的关键在于如何产生各节点的初始位置，如何得到各节点的受力公式、各节点的移动策略以及不同单元的布局终止条件。本文规定节点均为正方形，如不加特殊说明，各节点的位置均指其中心点(两条对角线的交点)位置。

3.3 节点初始位置的生成策略

放射布局应用于类树结构时，可以产生具有良好对称性的布局，比较美观，以此为鉴，就某个 ClusterNode 而言，可以将其所包含的子节点布局在一个边长为 Edge 的正方形平面内，并以虚节点(该正方形平面的中心点)为对称的圆心点，放置在各同心圆的圆周上，从而生成一个中心对称或者近似中心对称的初始化布局。

如图 3 所示，建立 ClusterNode 的布局平面坐标系，以虚节点 $O(\frac{Edge}{2}, \frac{Edge}{2})$ 为圆心(图中心的红色圆点)， r 为半径， θ 值取 0 。在 $(r\cos\theta + \frac{Edge}{2}, r\sin\theta + \frac{Edge}{2})$ 处放置子节点，并顺时针(或者逆时针)

旋转 \overline{OV} ，均匀变化 θ 值。当 \overline{OV} 回到第一个子节点的位置时，就适当增大 r ，适当减小 θ 。重复该过程，直至将所有子节点的位置初始化完毕。

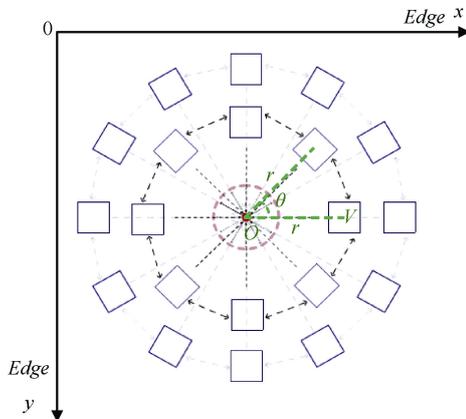


图3 生成节点初始位置原理示意图

在此过程中，需要注意几个问题：

- (1) 布局平面的边长 Edge 值如何设定？
- (2) 初始化半径 r 应该为多大？
- (3) 针对不同半径的同心圆， θ 应该取什么值？
- (4) 半径增长的幅度应该有多大？

在初始化 ClusterNode 与 ConceptNode 的位置时，也基本可以采用以上的策略。其区别之处在于：

- (1) 布局平面可以认为是边长趋近于无穷大的正方形；
- (2) 虚节点的位置放置 ConceptNode；
- (3) 子节点的位置放置 ClusterNode。

3.4 ClusterNode 内子节点的布局

ClusterNode 内子节点布局的引斥力公式，在文献[5]中已作过探讨，本文不再做重复陈述。需要指出的是在图 3 中，红色的蚂蚁线圈所示的范围即为文献[5]公式(7)的应用条件。

(1) ClusterNode 内布局的节点移动策略

ClusterNode 内子节点为一致节点，数目通常较多，初始化位置后，布局已基本成型，只需做微调即可。所以子节点的移动应是单步移动，即每个节点在平面上的 x 轴和 y 轴方向单次至多各移一步(步的单位是像素)。此处，笔者参考曾汉龙^[24]的做法。如图 4 所示，以子节点的当前位置为准，确定 8 个位移区域，每个区域以 (a, b) 表示，其中 a 和 b 分别表示子节点所受

合力落在该区域时, 该子节点在 x 轴和 y 轴方向应移动的距离。

每当各子节点的位置确定后, 就利用文献[5]中公式(5)至公式(7)计算出其合力, 再结合上文中划分区域的办法, 求得其下一步的位移, 并将其移至新位置。

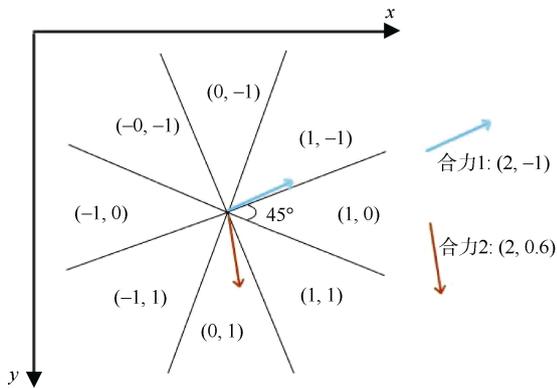


图 4 ClusterNode 内节点移动策略图^[24]

(2) ClusterNode 内布局的终止条件

ClusterNode 内子节点的布局无须一直进行, 结束布局的“终态点”就是布局的终止条件。实验观察发现, 当子节点布局到一定程度时, 便几乎不再移动或者不停抖动。所以, 笔者分别以 NewPosition [ChildNum]和 OldPosition[ChildNum]存储 CIN(S) 所包含子节点的新旧位置, 当两者相等时, 即认为 ClusterNode 内的布局可以结束, 具体如下所示:

$$\text{OldPosition}[\text{ChildNum}] = \text{NewPosition}[\text{ChildNum}] \quad (1)$$

3.5 ConceptNode 与 ClusterNode 间的非一致节点布局

ClusterNode 因其 ChildNum 不同, 呈现出非一致性, 如图 5 所示。由于所有的 ClusterNode 都不要求进行旋转操作, 所以各节点边的位置关系就只存在平行

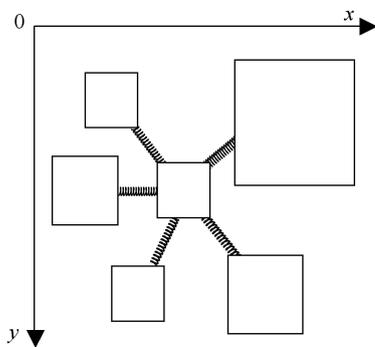


图 5 ConceptNode 与 ClusterNode 布局逻辑图

与垂直两种。Lin 等^[16]构成了一种特殊情形, 但遗憾的是, 作者并未就此展开论述。本文将从库仑定律的角度重新进行探讨, 以 ClusterNode 的大小(主要为边长)和相互之间的距离为调节因子, 产生斥力公式。同时, 经典的弹簧模型依旧用来产生 ConceptNode 与 ClusterNode 之间的弹力, 一如文献[5]所述。

(1) ConceptNode 与 ClusterNode 之间的斥力

笔者规定, 将 ConceptNode 和 ClusterNode 的各边都视为均匀带同种电荷的线电荷。那么, ConceptNode 与 ClusterNode 之间, 各 ClusterNode 之间便会因此而产生相互排斥的力。笔者将根据库仑定律、电场强度、连续带电体的场强和场强叠加原理等求出该力的表达式。如图 6 所示, 其中的红色线段表示的是一根有限长的线密度为 λ_1 的带电导体, 其场强计算公式如下:

$$E_x = \frac{\lambda_1}{k \times |y_1 - y_2|} \times (\sin \theta_2 - \sin \theta_1) \quad (2)$$

$$E_y = \frac{\lambda_1}{k \times |y_1 - y_2|^2} \times (y_2 - y_1) \times (\cos \theta_1 - \cos \theta_2) \quad (3)$$

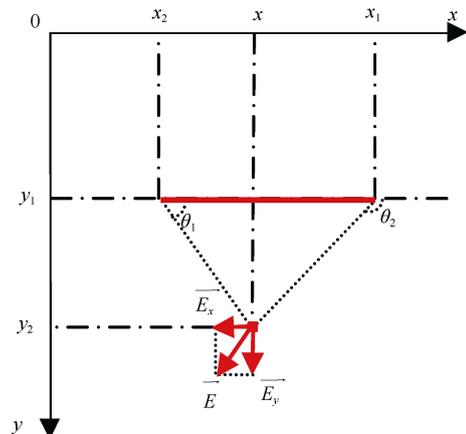


图 6 有限带电导体求场强示意图

ConceptNode、ClusterNode 以及 ClusterNode 之间斥力产生原理相同。为简单起见, 仅以求 ConceptNode 与 ClusterNode 之间斥力为例。令 ConceptNode 与 ClusterNode 的线密度(各边上电荷分布的稠密程度)分别为 λ_1 、 λ_2 。两节点的边之间的位置可以归纳为以下几种情形, 如图 7-图 12 所示。其中红色线电荷表示 ConceptNode 的边, 而蓝色线电荷表示 ClusterNode 的边。

① 两边平行但不共线

如图 7 所示, 根据公式(2)、公式(3)积分可得:

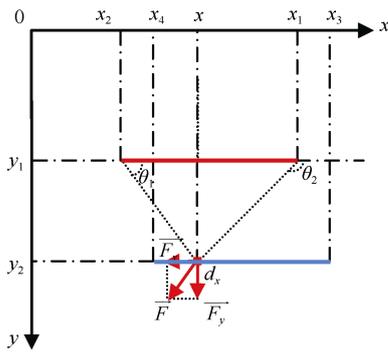


图7 两边沿 x 轴平行但不共线

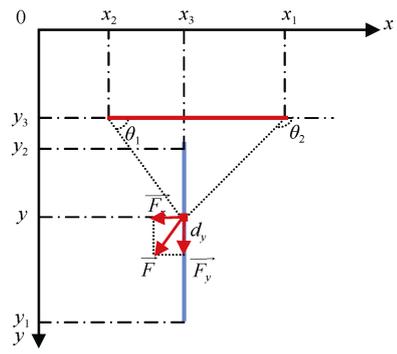


图11 两边垂直, 红边平行于 x 轴

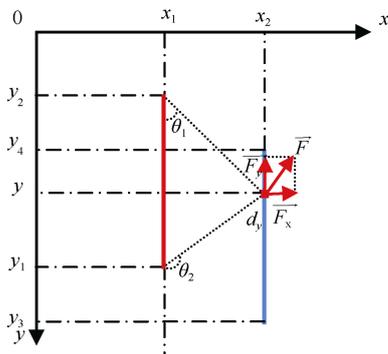


图8 两边沿 y 轴平行但不共线

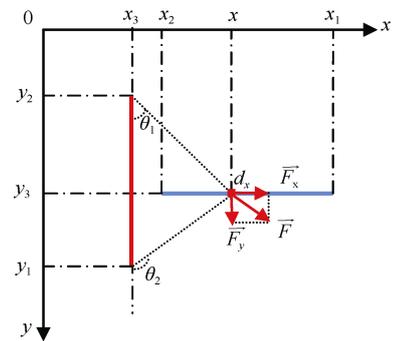


图12 两边垂直, 红边平行于 y 轴

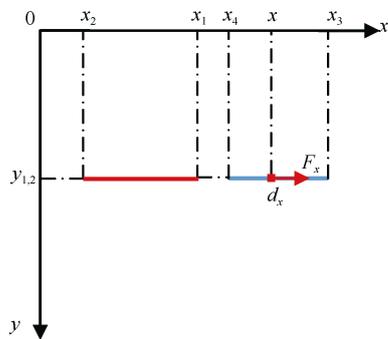


图9 两边沿 x 轴共线

$$F_x = \int_{x_4}^{x_3} f_x = \frac{\lambda_1 \times \lambda_2}{k} \times (\ln(|x - x_1| + \sqrt{(y_1 - y_2)^2 + (x - x_1)^2}) - \ln(|x - x_2| + \sqrt{(y_1 - y_2)^2 + (x - x_2)^2})) \Big|_{x_4}^{x_3} \quad (4)$$

$$F_y = \int_{x_4}^{x_3} f_y = \frac{\lambda_1 \times \lambda_2}{k \times |y_1 - y_2|^2} \times (y_2 - y_1) \times (\sqrt{(y_1 - y_2)^2 + (x - x_2)^2} - \sqrt{(y_1 - y_2)^2 + (x - x_1)^2}) \Big|_{x_4}^{x_3} \quad (5)$$

② 两边共线

如图9所示, 根据公式(2)、公式(3)积分可得:

$$F_x = \int_{x_4}^{x_3} f_x = \frac{\lambda_1 \times \lambda_2}{k} \times \frac{(x_3 + x_4) - (x_1 + x_2)}{|(x_3 + x_4) - (x_1 + x_2)|} \times (\ln(|x - x_1|) - \ln(|x - x_2|)) \Big|_{x_4}^{x_3} \quad (6)$$

$$F_y = 0 \quad (7)$$

③ 两边垂直

如图11所示, 根据公式(2)、公式(3)积分可得:

$$F_x = \int_{y_2}^{y_1} f_x = \frac{\lambda_1 \times \lambda_2}{k} \times (\ln(|y - y_3| + \sqrt{(y - y_3)^2 + (x_3 - x_1)^2}) - \ln(|y - y_3| + \sqrt{(y - y_3)^2 + (x_3 - x_2)^2})) \Big|_{y_2}^{y_1} \quad (8)$$

至于 F_y , 则有:

当 $y_3 < y_2$ 时:

$$F_y = \int_{y_2}^{y_1} f_y = \frac{\lambda_1 \times \lambda_2}{k} \times \frac{(y_1 + y_2 - 2y_3)}{|y_1 + y_2 - 2y_3|} \times (\ln \frac{\sqrt{(x_3 - x_2)^2 + (y - y_3)^2} - (x_3 - x_2)}{y - y_3} - \ln \frac{\sqrt{(x_3 - x_1)^2 + (y - y_3)^2} - (x_3 - x_1)}{y - y_3}) \Big|_{y_2}^{y_1} \quad (9)$$

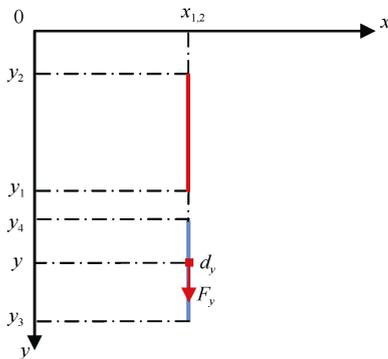


图10 两边沿 y 轴共线

当 $y_3 > y_1$ 时:

$$F_y = \int_{y_2}^{y_1} f_y = -\frac{\lambda_1 \times \lambda_2 \times (y_1 + y_2 - 2y_3)}{k |y_1 + y_2 - 2y_3|} \times \frac{(\ln \sqrt{(x_3 - x_2)^2 + (y - y_3)^2} - (x_3 - x_2))}{y_3 - y} - \frac{(\ln \sqrt{(x_3 - x_1)^2 + (y - y_3)^2} - (x_3 - x_1))}{y_3 - y} \quad (10)$$

至于图 8、图 10、图 12 所示的情形, 可根据对称性求出, 篇幅所限, 不再一一列举。

(2) ConceptNode 与 ClusterNode 的移动策略

群组化后的特定叙词, 其包含的 ClusterNode 数目通常较少。ConceptNode 与 ClusterNode 每次的移动幅度越大, 该布局单元完成布局也就越快。

就 ClusterNode 而言, 如果施加等大的力, 那么 ChildNum 比较大的 ClusterNode 较 ChildNum 比较小的 ClusterNode 有更小的位移。既符合物理现实, 也更便于提高算法的实际运行效率。笔者依据经典的牛顿力学, 设计公式(11)来确定 ClusterNode 的位移:

$$\bar{S} = \frac{1}{2} \times \frac{\bar{F}}{M \times \text{ChildNum}} \times t^2 \quad (11)$$

其中, \bar{F} 表示节点受到的合力, M 为常数, 表示单个子节点的质量。根据公式(11), ClusterNode 的移动事实上就间接地考虑到质量。

ConceptNode 由于不存在 ChildNum 的概念, 所以不能直接套用公式(11), 但其移动幅度也应从快, 为简化问题, 直接略去其中的 ChildNum 参数即可。

(3) ClusterNode 间布局的终止条件

参照 ClusterNode 内布局结束的判定, 以 OldClusterPosition[ClusterNodeNum] 表示 ClusterNode 的旧位置, NewClusterPosition[ClusterNodeNum] 表示 ClusterNode 的新位置, 当两者的误差在 ϵ (ϵ 为包含一组较小数的向量) 之内时, 即可认定布局符合终止条件, 具体如下所示:

$$| \text{OldClusterPosition}[\text{ClusterNodeNum}] - \text{NewClusterPosition}[\text{ClusterNodeNum}] | < \epsilon \quad (12)$$

3.6 节点碰撞的处理策略

在节点布局的过程中, 无论是 ClusterNode 内子节点之间, 还是 ClusterNode 之间, 以及 ConceptNode 与 ClusterNode 之间, 都会出现节点碰撞问题, 所谓的节点碰撞, 是指两个节点相交或者其中心点重合。在图 13 的坐标系中, 共有 A、B 和 C 三个节点, 分别以绿、黄和黑色(虚线)加以区分, 其中 B 与 C 重合。另外, 位于各节点中心点处的红色小圆点表示其受力

的作用点。

如图 13 所示, 根据库仑定律, 制订处理策略如下:

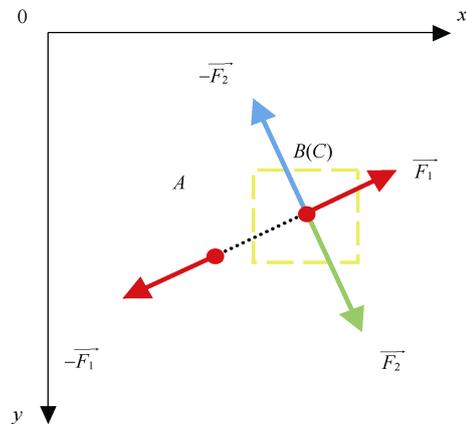


图 13 节点碰撞及处理策略示意图

(1) 发生 A 与 B(C) 相交的情形时, 赋予 A 和 B(C) 第三方斥力, 力的大小为 $|\bar{F}_1|$, 方向沿 A、B 中心点的连线, 且 A 对 B(C) 的斥力由 A 指向 B(C), B(C) 对 A 的斥力由 B(C) 指向 A;

(2) 发生 B 与 C 的中心点重合的情形时, 赋予 B 和 C 第三方斥力, 力的大小为 $|\bar{F}_2|$, 力的方向随机产生, 但两者的方向相反。

4 算法实现与实验

笔者借助富因特网应用(RIA)编辑工具 Adobe Flash, 以 ActionScript3.0 语言实现了一款可视化原型系统。图 14-图 18 是以中文叙词表本体为对象, 采集到的较有代表性的叙词“非生产领域经济学”、“补血药”、“传声器”、“服装”和“双子叶植物”的布局结果。

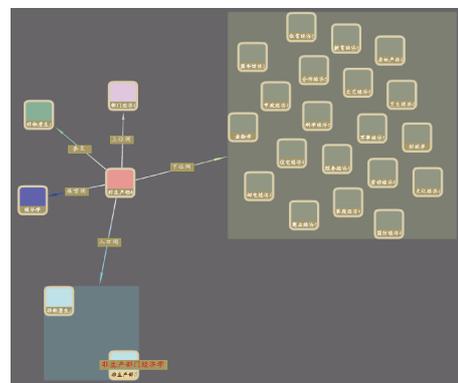


图 14 叙词“非生产领域经济学”的布局

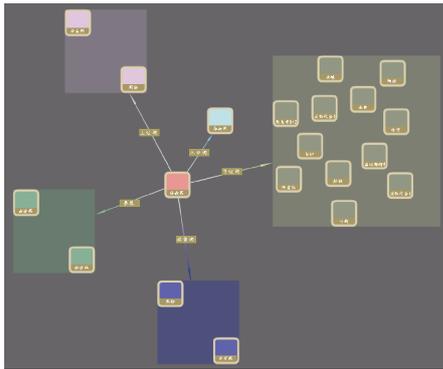


图 15 叙词“补血药”的布局

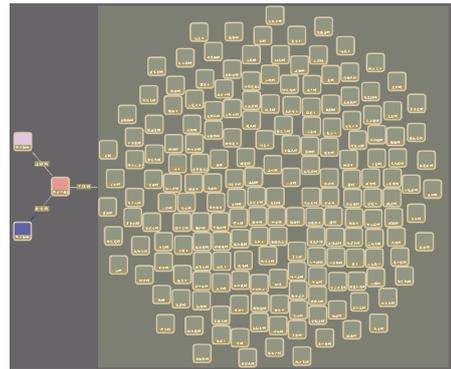


图 18 叙词“双子叶植物”的布局

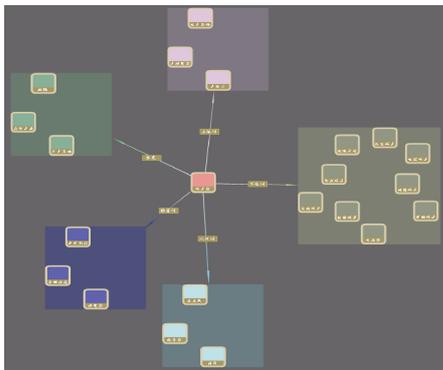


图 16 叙词“传声器”的布局



图 17 叙词“服装”的布局

直观地看，布局层次鲜明，结构清晰，群组的优点跃然纸上，有效避免了现有相关可视化工具当关系词数目繁多时会导致的布局凌乱问题。笔者将从量化的角度去审视该算法。

对布局的衡量主要取决于以下几个指标：布局的节点数目、ConceptNode 的角辨识度、边长方差以及算法的迭代次数。角辨识度如果有 0 值出现，说明发生了边交叉。用边长方差度量布局的边长一致性，其值越小则说明各边长值差别越小。需要说明的是，在算法实现中，布局的动画效果是由一个间隔为 10ms 的定时器控制的，所以算法的实际运行时间直接由迭代次数反映。

表 1 展示了本节中所罗列的 5 种叙词布局的衡量指标值。有效次数表示的是此次布局趋于稳定时，算法实际迭代的次数，而实际次数表示的是算法结束时的迭代次数。

从表 1 来看，图 14-图 16 的节点数目大致相仿，但 ChildNum 大于 1 的群组个数逐步增加，平均边长逐步增大。事实上，ChildNum 较大的 ClusterNode 所占据的面积也较大，如图 15 中 CIN(下位词)所占据的

表 1 图 14-图 18 的算法衡量指标

指标数据	节点数目	ChildNum 大于 1 的群组个数	最大 ChildNum	角辨识度	边长一致		迭代次数	
					平均边长	边长方差	实际次数	有效次数
图 14	26	2	20	51.38	193.19	0.20	500	72 左右
图 15	20	4	12	42.23	227.30	0.22	500	64 左右
图 16	22	5	9	49.04	282.83	0.25	128	128
图 17	22	1	20	180	142.25	0.03	500	132 左右
图 18	188	1	185	98.05	133.67	0.02	500	288 左右

面积就明显大于 CIN(族首词)。根据相关公式,其间的斥力也就越大,从而导致相互之间的距离更加疏远。另一方面,ChildNum 大于 1 的 ClusterNode,其个数又往往参差不齐,如图 15 和图 16 中,前者 ChildNum 为 2 的 ClusterNode 有 3 个,而后者 ChildNum 为 3 的 ClusterNode 有 4 个,这也会造成 ClusterNode 之间的距离发生较大的偏差。此外,三者的角辨识度呈现的规律不明显,但值都较大,不至于在多 ClusterNode 时出现边的交叉问题。

图 17 和图 18 所包含的节点数目分别为 22 和 188,悬殊较大,且都只包含一个较大的 ClusterNode。由于两者所包含的 ClusterNode 个数都较小,所以角辨识度值都很高。另外,图 18 的平均边长要明显小于图 17。这是由于图 18 中的大 ClusterNode,其 ChildNum 较大,根据“大 ClusterNode 多动,小 ClusterNode 少动”的原则,其移动幅度相对较小。但从边长方差来看,两者的边长一致性都较好。

在图 16、图 15、图 17 和图 18 中,最大 ClusterNode 的 ChildNum 分别为 9、12、20 和 185,呈明显的递增态势,而其对称性也依次增强,直至图 18 中,CIN(下位词)的子节点对称性已经非常好了。可见,本算法中 ClusterNode 内部的布局策略,在 ChildNum 越大时,其对称性效果也越好。

需要指出的是图 15 中的情形,ClusterNode 基本上较好地满足群组到角的美学原则,但 CIN(入口词)无疑是一种例外。图中的 CIN(上位词)和 CIN(下位词)与其相邻,且 CN(CIN(下位词))大于 CN(CIN(上位词)),但很明显 $\angle \text{CIN(下位词)}_{\text{CIN(入口词)}}$ 却并不比 $\angle \text{CIN(上位词)}_{\text{CIN(入口词)}}$ 大。前文中曾申明,本算法志在改变前期研究^[5]中的群组到角问题,此时似乎这种问题并没有得到根本解决。但比较图 2 和图 14,仍然可以看出本算法在其他美学指标上的优越性,图 14 在边长一致及角辨识度上表现得更为优秀。此外,图 16 的 CIN(族首词)也存在这样的问题。由此可见,美学指标之间也存在一些矛盾,很难一一满足。权衡之下,笔者以为,这种小的缺憾是瑕不掩瑜的。

观察迭代次数一栏,除图 16 外,其余各图的有效

次数都小于实际次数。这通常是 ChildNum 大的 ClusterNode 冗余抖动所致,是不必要的,说明 ClusterNode 内布局的结束条件还有待改善。

总而言之,本文所提算法较好地满足了美学衡量指标,算法性能也在承受范围之内。

此外,文献[5]曾提出将图片信息整合到中文叙词表本体的可视化系统中,结合唐钺^[25]的图片语义搜索研究成果,笔者已完全实现这一既定目标,如图 17 为填充了图片信息的叙词“服装”的布局。添加了图片信息后的可视化系统,变得更加丰富饱满,也更有吸引力。同时,节点中的图片信息区还可以放置音、视频等内容,这为有需要的应用留下了相当大的伸缩空间。有兴趣的读者可登录 CCT1-OTCSS^①体验,欢迎使用并给予宝贵建议。

5 结 语

本算法将本质为图的中文叙词表本体,解析为一棵深度为 1 的树,通过借助群组的概念,将其演变为深度为 2 的树。这为结合语义信息,化图为树,并利用力导向算法布局,提供了一种可行的思路。

实现的可视化原型系统支持 OWL、SKOS、CNKOS 等基于 RDF 三元组的语义 Web 描述语言所表示的数据,可广泛应用于网络知识组织系统(尤其是中文 NKOS)中概念实例的可视化展示。

本算法的可视化效果虽然已达到中文叙词表本体可视化的预期,但依然存在若干可以进一步完善之处:

(1) 算法的收敛:实验表明,本文所给出的算法收敛条件,效果还不够显著,导致在布局中存在有碍观瞻的冗余抖动。笔者认为,今后的研究可尝试引入温度等神经计算的概念解决此问题。

(2) 可视化的完善:国外比较完善的可视化软件,能够在—个视窗中以更大更全的方式显示复杂的词间关系。因此,笔者认为必要时可更进一步借鉴先进成果,深化中文 NKOS 的可视化问题。

参考文献:

- [1] Gruber T. A Translation Approach to Portable Ontology

① <http://nkos.lib.szu.edu.cn:8080/ThesaurusProjectForCCTWL/login.jsp>(匿名进入,检索后点击命中叙词后的眼镜图片即可。可二次检索、缩放或拖动。)

- Specifications [J]. Knowledge Acquisition, 1993, 5(2): 199-220.
- [2] 曾新红. 中文叙词表本体——叙词表与本体的融合[J]. 现代图书情报技术, 2009(1): 34-43. (Zeng Xinhong. Onto-Thesaurus (Chinese-Thesaurus-Ontology) ——An Integration of Thesaurus and Ontology [J]. New Technology of Library and Information Service, 2009(1): 34-43.)
- [3] W3C. OWL 2 Web Ontology Language Document Overview [EB/OL]. [2013-03-19]. <http://www.w3.org/TR/2009/REC-owl2-overview-20091027/>.
- [4] 曾新红, 明仲, 蒋颖, 等. 中文叙词表本体共建共享系统研究[J]. 情报学报, 2008, 27(3): 386-394. (Zeng Xinhong, Ming Zhong, Jiang Ying, et al. Research on OntoThesaurus Co-construction and Sharing System (OTCSS) [J]. Journal of the China Society for Scientific and Technical Information, 2008, 27(3): 386-394.)
- [5] 曾新红, 蔡庆河, 曾汉龙, 等. 中文叙词表本体可视化群组布局算法研究与实现[J]. 现代图书情报技术, 2012(10): 8-15. (Zeng Xinhong, Cai Qinghe, Zeng Hanlong, et al. The Research and Implementation of Clustered Graphs Layout Algorithm for OntoThesaurus Visualization [J]. New Technology of Library and Information Service, 2012(10): 8-15.)
- [6] 袁晓如, 张昕, 肖何, 等. 可视化研究前沿及展望[J]. 科研信息化技术与应用, 2011, 2(4): 3-13. (Yuan Xiaoru, Zhang Xin, Xiao He, et al. Visualization Research Frontier and Prospects [J]. E-Science Technology & Application, 2011, 2(4): 3-13.)
- [7] Tollis I G. Graph Drawing and Information Visualization [J]. ACM Computing Surveys, 1996, 28(4es): Article No. 19.
- [8] Battista G D, Eades P, Tamassia R, et al. Algorithms for Drawing Graphs: An Annotated Bibliography [J]. Computational Geometry: Theory and Applications, 1994, 4(5): 235-282.
- [9] Purchase H C. Metrics for Graph Drawing Aesthetics [J]. Journal of Visual Languages and Computing, 2002, 13(5): 501-516.
- [10] Noack A. Energy Models for Graph Clustering [J]. Journal of Graph Algorithms and Applications, 2007, 11(2): 453-480.
- [11] Frishman Y, Tal A. Dynamic Drawing of Clustered Graphs [C]. In: Proceedings of the IEEE Symposium on Information Visualization, Austin, TX, US. IEEE Computer Society, 2004: 191-198.
- [12] Herman I, Melançon G, Marshall M S. Graph Visualization and Navigation in Information Visualization: A Survey [J]. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, 2000, 6(1): 24-43.
- [13] Tutte W T. How to Draw a Graph [J]. Proceedings of the London Mathematical Society, 1963, 13(3): 743-767. DOI: 10.1112/plms/s3-13.1.733.
- [14] Eades P A. A Heuristic for Graph Drawing [J]. Congressus Numerantium, 1984, 42(11): 149-160.
- [15] Kobourov S G. Spring Embedders and Force Directed Graph Drawing Algorithms [EB/OL]. [2013-03-19]. <http://arxiv.org/pdf/1201.3011v1>.
- [16] Lin C C, Yen H C, Chuang J H. Drawing Graphs with Nonuniform Nodes Using Potential Fields [J]. Journal of Visual Languages and Computing, 2009, 20(6): 385-402.
- [17] Harel D, Koren Y. Drawing Graphs with Non-Uniform Vertices[C]. In: Proceedings of the Working Conference on Advanced Visual Interfaces. New York: ACM Press, 2002: 157-166.
- [18] Kumar G, Garland M. Visual Exploration of Complex Time-Varying Graphs [J]. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, 2006, 12(5): 805-812.
- [19] Frishman Y, Tal A. Online Dynamic Graph Drawing [J]. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, 2008, 14(4): 727-740.
- [20] Hachul S, Jünger M. Drawing Large Graphs with a Potential Field-Based Multilevel Algorithm [C]. In: Proceedings of the 12th International Conference on Graph Drawing. Berlin: Springer-Verlag, 2004:285-295.
- [21] Duncan C A, Eppstein D, Goodrich M T, et al. Lombardi Drawings of Graphs [C]. In: Proceedings of the 18th International Symposium on Graph Drawing. Berlin: Springer-Verlag, 2011: 195-207.
- [22] Chernobelskiy R, Cunningham K I, Goodrich M T, et al. Force-Directed Lombardi-Style Graph Drawing [C]. In: Proceedings of the 19th International Symposium on Graph Drawing. Berlin: Springer-Verlag, 2012: 320-331.
- [23] Kobourov S G, Wampler K. Non-Euclidean Spring Embedders [J]. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, 2005, 11(6): 757-767.
- [24] 曾汉龙. 中文叙词表本体可视化群组布局算法研究与实现 [D]. 深圳: 深圳大学, 2010. (Zeng Hanlong. The Research and Implementation of Clustered Graphs Layout Algorithm for OTCSS Visualization [D]. Shenzhen: Shenzhen University, 2010).
- [25] 唐铖. 基于图像语义搜索的中文叙词表本体可视化研究 [D]. 深圳: 深圳大学, 2012. (Tang Cheng. The Research of Visualization for OntoThesaurus Based on Image Semantic Search [D]. Shenzhen: Shenzhen University, 2012.)

作者贡献声明:

曾新红: 确定系统需求, 提出研究思路, 系统测试, 论文修订和最终定稿;

蔡庆河: 研究方案的具体设计, 系统实现, 论文撰写;

黄华军: 系统整合和系统测试;

林伟明: 系统整合。

(通讯作者: 曾新红 E-mail: zengxh@szu.edu.cn)

Research on Non-uniform Node Clustered Graph Layout Algorithm for Visualization Based on Force Directed Model

Zeng Xinhong^{1,2} Cai Qinghe² Huang Huajun¹ Lin Weiming¹

¹(Shenzhen University Library, Shenzhen 518060, China)

²(College of Computer and Software, Shenzhen University, Shenzhen 518060, China)

Abstract: [Objective] This paper presents a non-uniform node clustered graph layout algorithm in order to realize intuitive, lively and beautiful information visualization. [Methods] After insight into the relationship between force-directed algorithm and information visualization, the paper puts forward this algorithm based on force-directed model with the help of cluster and non-uniform node concepts, using charge theory as a breakthrough. The algorithm employs the hierarchical layout ideas, and every layout unit is produced independently by similar but different layout strategies. [Results] A visualization prototype system for the NKOS is implemented with it, and can be widely applied to visualizing the instances of concept class in the NKOS (especially the Chinese NKOS). [Limitations] The result of the proposed algorithm convergence conditions is not significant, so that in the process of layout, there is redundant node vibrating. Temperature and other related concepts of neural computation can be introduced to solve it in the future. [Conclusions] The paper finds a way to transfer a graph structure with semantic information into a tree structure, and based on the cluster concept, using the force directed algorithms to solve its layout problems. This algorithm can deal with the visualization for instances of concepts in Chinese NKOS, such as OntoThesaurus, and the drawing community can solve other similar problems by using it as a reference.

Keywords: Information visualization Force-directed algorithm Non-uniform node Cluster layout OntoThesaurus NKOS