

复杂网络拓扑可视化方案设计与实现

张 畅, 谢 钧, 胡谷雨, 段伟伟

(解放军理工大学 指挥信息系统学院, 江苏 南京 210000)

摘 要:针对复杂网络拓扑采用传统网络拓扑可视化方式呈现会导致网络结构信息难以观察的问题,文中在提出一种基于节点和边关键性的网络拓扑压缩算法—NECB算法以及改进的FDA算法—FR算法的基础上,利用复杂网络拓扑可视化软件NetworkX设计并实现了一种复杂网络拓扑可视化方案。呈现结果表明NECB算法能在有效压缩网络拓扑规模的同时保存原始网络的主要信息,该方案能有效展现复杂网络拓扑的结构信息,为分析复杂网络提供支持。

关键词:复杂网络;NECB算法;FR算法;NetworkX;可视化

中图分类号:TP302.1

文献标识码:A

文章编号:1673-629X(2014)12-0078-05

doi:10.3969/j.issn.1673-629X.2014.12.019

Design and Implementation of Complex Network Topology Visualization Scheme

ZHANG Chang, XIE Jun, HU Gu-yu, DUAN Wei-wei

(College of Command Information System, PLA University of Science and Technology, Nanjing 210000, China)

Abstract:For the problem that is difficult to observe the characteristics of the complex network topology by using the traditional network topology visualization algorithm, on the basis of presenting a network topology compression algorithm based on nodes and edge - NECB algorithm and FR algorithm which is an improved FDA algorithm, design and implement a scheme of complex network topology visualization through the network visualization software NetworkX. The results show that the NECB algorithm is able to compress the network topology effectively and save the important information of the original network at the same time, while the scheme can effectively show the characteristics of the complex network topology which supports the analysis of complex network.

Key words:complex network;NECB algorithm;FR algorithm;NetworkX;visualization

0 引言

随着互联网的迅猛发展,网络拓扑结构也变得日益复杂。为了认识复杂网络的内部结构,挖掘其中隐藏的有价值的信息,最直接有效的方法就是将其可视化。复杂网络可视化作为信息可视化的一个重要分支,在 Graph Drawing, InfoVis 等重要国际会议中成为一个日益受到关注的议题,引起了各国学者的高度重视。文中针对复杂网络可视化提出了一种压缩算法,并结合力引导布局利用可视化工具 NetworkX 对复杂网络拓扑进行呈现。

1 基本原理

复杂网络区别于一般网络主要在于它节点数量巨大而且关系复杂,隐藏着一些特别的性质,最具有代表

性的是小世界特性和无尺度特性^[1]。小世界特性是指网络分布整体聚集度很高,但是节点之间的平均最短路径很低;无尺度特性则是指网络中节点度数服从幂率分布。复杂网络的特性导致传统的网络拓扑可视化方法无法适用,因此复杂网络拓扑的可视化需要专门的算法,主要包括压缩算法和布局算法。

规模庞大的复杂网络拓扑如果不进行压缩,呈现出的点和边将会非常的密集,人们将很难从布局中获取有效信息。压缩算法可以帮助人们更好地理解复杂网络的整体结构,分析网络拓扑的一些特性,比如社团结构、最短路径等。压缩可以分为对节点的压缩和对边的压缩,根据这两种不同的思路,学者们提出了众多可视化压缩算法,比如 Gilbert 等人根据节点的重要性和相似性提出了一种针对节点的压缩算法^[2],通过删

收稿日期:2014-01-23

修回日期:2014-04-27

网络出版时间:2014-10-23

基金项目:国家“863”高技术发展计划项目(2012AA01A510);“十二五”预研资助项目(2121211001050102)

作者简介:张 畅(1989-),男,湖北汉川人,硕士,研究方向为计算机网络。

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1450.TP.20141023.1102.021.html>

除非重要节点以及与之相关的边来达到压缩拓扑的目的,其效果如图 1 所示。Holten 等人则提出一种自组织的边绑定算法来对边进行压缩^[3],针对过多的边相互交错重叠的问题,在不减少节点和边数目的基础上将图中相邻的边捆绑成束,其效果如图 2 所示。

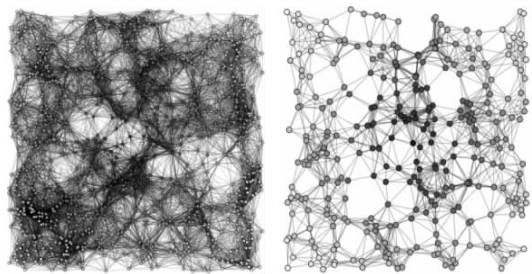


图 1 节点压缩效果图

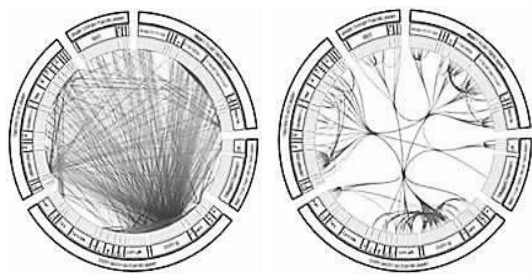


图 2 边绑定效果图

经过压缩的复杂网络拓扑实现可视化还需要根据需求选取合适的布局算法,这里可以借鉴传统的网络拓扑布局算法,主要有正交布局算法、径向布局算法^[4]、力引导布局算法^[5] (Force-Directed Algorithm, FDA) 等。在正交布局中,节点沿水平或垂直方向排列;径向布局中,根节点位于界面中心,各层子节点放在半径不同的同心圆上;FDA 则是模拟弹簧系统的动态平衡过程排列各个节点,三种布局效果如图 3 所示。

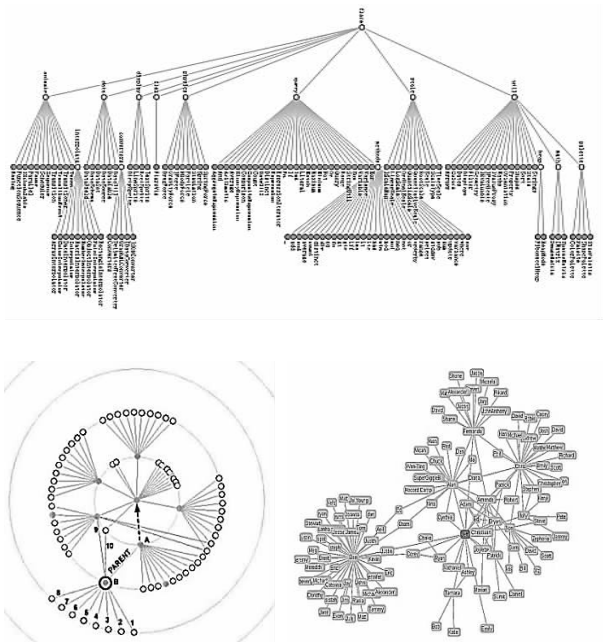


图 3 布局效果示意图

压缩的复杂网络拓扑选择合适的布局算法后,还需要选择适当的网络拓扑可视化工具,按通用性高低可分为网络可视化类库、通用网络可视化工具、专用网络可视化工具三类^[6]。类库主要包括 igraph、JUNG、NetworkX 等,它们分别基于 C、Java、Python 等不同的语言,提供常见的布局算法和基础的分析工具。通用工具主要包括 Pajek、Graphviz、TopFish 等,它们提供了丰富的分析方法和基本的交互功能。专用工具常见的有 UCINET、TGGB、WhatsOnWeb 等,它们针对某一特定的网络能提供良好的可视化性能。

2 方案设计

复杂网络可视化方案设计的关键在于可视化工具和算法的选择。文中设计的方案中,可视化工具选择基于 Python 的软件包 NetworkX^[7],压缩算法采用提出的一种基于节点和边的关键性压缩网络拓扑算法 (Node and Edge Centrality Based network compressing algorithm, NECB),布点算法则选择基于 FDA 改进的经典 FR 算法^[8],整体方案如图 4 所示。

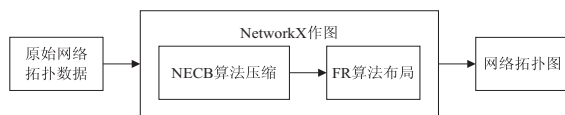


图 4 整体方案流程图

原始的网络拓扑数据经过 NetworkX 作图生成网络拓扑图,而 NECB 算法和 FR 算法则利用 NetworkX 通过 Python 编程实现。

2.1 NetworkX 介绍

NetworkX 是一种基于 Python 语言开发的网络可视化工具,集成了众多专门针对复杂网络的分析算法,非常适合复杂网络拓扑的可视化,并能结合其他的 Python 软件包,比如 Numpy、Scipy、Matplotlib、Pygraphviz、Mayavi2 等数据分析和可视化工具进行使用。NetworkX 支持邻接矩阵、边列表、GML、Pajek 等多种类型的网络拓扑数据的读写,也可逐个添加或删除单个节点和边,同时还提供了大量直接生成某一类型复杂网络的函数。针对网络拓扑的性能分析,NetworkX 也提供了许多算法,对于同类型的网络,还支持并集、交集、差、子图等集合操作。

2.2 NECB 压缩算法

基于节点和边的拓扑压缩关键在于压缩标准的制定,如何评判压缩算法的有效性也是重要的方面。

2.2.1 压缩节点的选择

NECB 压缩算法中的压缩是针对节点进行的,这里仅针对简单无向图进行讨论。对于网络拓扑 $G = (V, E)$ 中任意节点 v ,是否删除它的参考标准主要有两点:节点 v 的度 $\deg(v)$ 和网络拓扑中经过该点的最短

路径数。

节点的度是网络拓扑最重要的属性之一,如果一个节点的度数越大,说明它与很多节点都有关联,那么它在网络拓扑中也就显得很关键^[9]。NECB 算法采用的计算公式如下:

$$W_{deg}(v) = \frac{|\deg(v)|}{|V|-1}$$

用 $W_{deg}(v)$ 的值衡量节点 v 关于度的关键性,除以 $|V|-1$ 是为了将其值归一化在 $[0,1]$ 范围内。

网络拓扑的平均最短路径长度也是其重要的属性之一。如果网络拓扑中多条最短路径经过某一节点,显然该节点扮演着重要角色^[9]。NECB 算法采用的计算公式如下:

$$W_{path}(v) = \sum_{s,t \in V} \frac{|\{\pi \in \prod(s,t) : v \in \pi\}|}{|\prod(s,t)|} \times \frac{2}{(|V|-1)(|V|-2)}$$

用 $W_{path}(v)$ 的值衡量节点 v 关于最短路径的关键性; $\prod(s,t)$ 表示网络拓扑中所有最短路径的集合; π 表示经过节点 v 的最短路径; $(|V|-1)(|V|-2)/2$ 是经过节点 v 的最短路径数的最大可能值,乘以 $2/(|V|-1)(|V|-2)$ 可以将其值归一化在 $[0,1]$ 范围内。

2.2.2 压缩算法流程

NECB 算法中的压缩本质上就是删除节点,这里对删除进行以下说明:对于网络拓扑 $G=(V,E)$,删除节点 v 是指从 E 中删除所有包含 v 的边,然后从 V 中删除 v 生成新的网络 G' ,NECB 算法流程如图 5 所示。

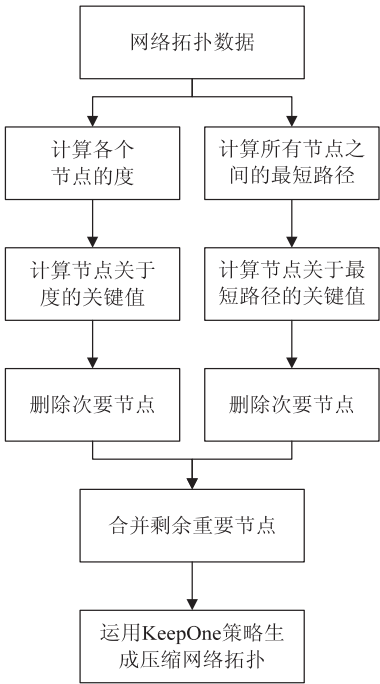


图 5 NECB 算法流程

首先计算网络拓扑中各个节点的度和所有节点之

间的最短路径,然后根据公式分别计算 $W_{deg}(v)$ 和 $W_{path}(v)$,删除值相对较小的次要节点,保留值相对较大的重要节点,再将得到的两个节点集合并。假设合并后的节点集合为 V_1 ,对于复杂网络,通常情况下,节点集合 V_1 构成的压缩图是连通的;若不连通,则需要对压缩拓扑进行补充,选择一个最小的节点集合 V_2 补充到压缩拓扑中,至少使得由 $V_1 \cup V_2$ 中节点构成的压缩图是连通的,这是一个 NP 完全问题。NECB 采用的是一种叫做 KeepOne 的策略。 V_1 中节点在 G 中的任意一条最短路径上的所有节点组成 V_2 , $V_1 \cup V_2$ 的完全图与原始网络拓扑 G 的交集即为最终的压缩网络拓扑 G' 。

KeepOne 策略的伪代码如下:

```
KeepOne( G=(V,E), V1 ):
if G'=(V1,E∩(V1×V1)) NOT Connect
V2←∅
for u,v∈V1:
V2←V2∪One of ShortestPath(u,v) in G
endfor
V'←V1∪V2
E'←E∩(V'×V')
return G'=(V',E')
else
return G'=(V1,E∩(V1×V1))
endif
end
```

保留的相对重要节点的个数决定了压缩网络拓扑的规模。假设根据 $W_{deg}(v)$ 和 $W_{path}(v)$ 得到的重要节点集合分别为 V_{deg} 和 V_{path} ,那么 $V_1=V_{deg} \cup V_{path}$,这里规定 $|V_{deg}| \leq 10 \times \lfloor \lg |V| \rfloor$ $|V_{path}| \leq 10 \times \lfloor \lg |V| \rfloor$

如果有多个点的 $W_{deg}(v)$ 和 $W_{path}(v)$ 的值相等,说明它们在网络中同等重要,应同时删除或者保留,因此节点个数相同的不同网络拓扑得到的 V_{deg} 和 V_{path} 中节点个数可能会不同。

2.2.3 压缩效果评价

压缩算法效果的评价标准是压缩图是否保持了原始网络拓扑的基本结构特性,这里根据压缩图中保存原始网络拓扑中关键边的多少来判定 NECB 算法是否有效,通过对比边的压缩率和重要边的保存率来作为衡量标准,压缩尽量多的边的同时保存的关键边越多,则认为 NECB 算法越有效。边 e 的关键性由网络拓扑中最短路径经过它的次数的多少来衡量^[10],计算公式如下:

$$W_{path}(e) = \sum_{s,t \in V} \frac{|\{\pi \in \prod(s,t) : e \in \pi\}|}{|\prod(s,t)|} \times \frac{2}{|V| \times (|V|-1)}$$

其中, $\Pi(s, t)$ 表示网络拓扑中所有最短路径的集合; π 表示经过边 e 的最短路径; $|V| \times (|V| - 1) / 2$ 是经过边 e 的最短路径数最大可能值, 乘以 $2 / (|V| \times (|V| - 1))$ 可以将其值归一化在 $[0, 1]$ 范围内。

假设 $W_{\text{path}}(e)$ 值大的边的集合为 E_{path} , 这里规定

$$|E_{\text{path}}| \leq \lfloor \frac{10 \times \lfloor \lg |V| \rfloor}{|V|} \times |E| \rfloor$$

如果有多条边的 $W_{\text{path}}(e)$ 值相等, 说明它们在网络中同等重要, 也应同时删除或者保留, 因此 $|V|$ 和 $|E|$ 值相同的不同网络拓扑得到的 E_{path} 中边的个数也可能不同。

2.2.4 算法验证

根据所示算法流程, 利用 NetworkX 对算法进行实现。这里先用一个社交网络的例子对算法进行验证, 图 6 所示为一简单的社交网络拓扑。

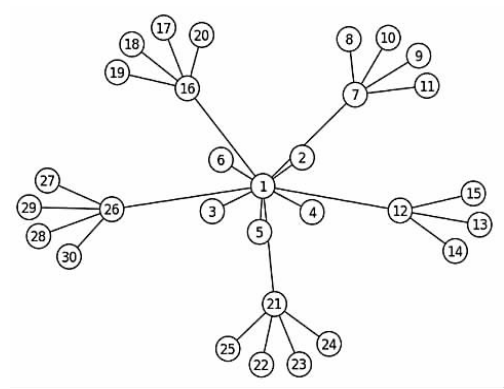


图 6 简单的社交网络拓扑图

节点代表人, 节点之间有边代表他们之间是朋友关系, 计算网络中所有节点的 $W_{\text{deg}}(v)$ 和 $W_{\text{path}}(v)$ 值, 网络保留的重要节点集合 V_{deg} 和 V_{path} 中节点个数为 6, 都是 $\{12, 7, 16, 21, 28, 1\}$, 合并以及采用 KeepOne 策略得到压缩网络拓扑节点集合都不变。得到的网络拓扑如图 7 所示。

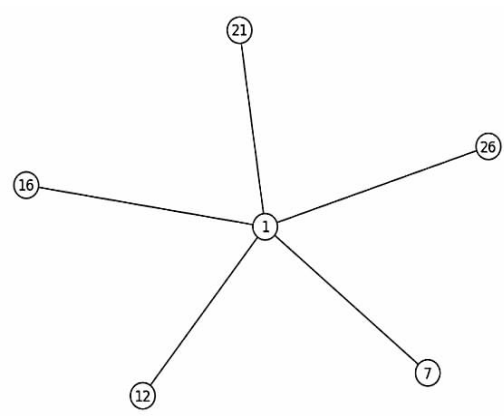


图 7 压缩后的社交网络拓扑图

从图 6 中容易看出节点 1、7、12、16、21、26 为核心关键节点, 它们之间的边为关键边; 从图 7 中可以看出压缩拓扑保留了关键节点和关键边, 在边的压缩率达

0.035 7 的同时重要边的保存率达 100%, 这说明 NECB 算法是有效的。

表 1 中列出了一些利用社交网络和复杂网络拓扑经过 NECB 算法压缩前后的参数。

1 和 2 是两个经典的社交网络分析数据集, 3 是由 1 000 个节点生成的 ER 随机网络, 4 是 WS 小世界模型网络, 5 是 NM 小世界网络, 6 是 BA 无标度网络, 7 是 HK 网络, 4 ~ 7 都是复杂网络中的一些经典模型^[11-14]。从表 1 中可以看出, NECB 算法能有效压缩它们的网络拓扑规模, 重要边的保存率都高于边的压缩率, 特别是 6 和 7 两类无标度网络, 这说明算法是有效的。

表 1 NECB 算法压缩效果

	网络拓扑	压缩前		压缩后		边压 缩率	重要边 保存率
		节点数	边数	节点数	边数		
1	karate_club_graph	34	78	12	26	0.333 3	0.500 0
2	davis_southern_women_graph	32	89	16	34	0.382 0	0.555 6
3	fast_gnp_random_graph	1 000	4 963	85	125	0.025 1	0.154 4
4	watts_strogatz_graph	1 000	2 000	287	375	0.187 5	0.333 3
5	newman_watts_strogatz_graph	1 000	2 184	221	309	0.141 5	0.261 5
6	barabasi_albert_graph	1 000	1 996	38	63	0.031 6	0.627 1
7	powerlaw_cluster_graph	1 000	1 996	37	62	0.031 1	0.627 1

2.3 FR 布点算法

FR 算法在借鉴粒子物理理论的基础上改进 FDA, 它将节点看作相互间存在引力和斥力的原子, 引力和斥力使原子运动^[8]。FR 算法并没有完全遵循物理规则, 从简化算法的角度做了适当的取舍, FR 算法计算所有原子间的斥力, 但仅仅计算相邻原子之间的引力, 另外, FR 算法通过力来直接计算原子运动的速度而不是加速度, 再通过速度来计算位移。为了限制原子移动的最大距离, FR 算法设置了一个位移阈值, 并提出了“温度”和“冷却”的概念。“温度”会随着迭代次数的增大而“冷却”, 移动的距离也越来越小, 当迭代结束时, “温度”降到 0 度, 原子也停止移动, 每次迭代被看作一个单位时间。

假设在 $W \times H$ 的区域内显示网络拓扑 $G = (V, E)$, 作如下定义:

节点 v 位置: V_p ;

节点 v 所受合力: $V_f = V_{fr} + V_{fa}$;

平衡距离: $k = \sqrt{\frac{W \times H}{|V|}}$;

节点 v 和 u 的欧拉距离: $d(u, v) = \|V_p - U_p\|$;

节点 v 和 u 之间的斥力: $f_r(u, v) = \frac{k^2}{d(u, v)}$;

节点 v 和 u 之间的引力: $f_a(u, v) = \frac{d(u, v)^2}{k}$;

位移阈值: S ;

初始温度: T ;
冷却函数: $\text{cool}(T)$ 。
其中, V_{fr} 为 v 所受斥力的合力, V_{fa} 为 v 所受引力的合力。

FR 算法的伪代码如下:

```
While(  $T > 0$  ) :  
  for  $v$  in  $V$ :  
     $V_{\text{fr}} \leftarrow 0$   
     $V_{\text{fa}} \leftarrow 0$   
    for  $u$  in  $V$ :  
      if  $u \neq v$ :  
         $V_{\text{fr}} \leftarrow V_{\text{fr}} + f_{\text{r}}(u, v)$   
      endif  
      if  $(u, v)$  in  $E$ :  
         $V_{\text{fa}} \leftarrow V_{\text{fa}} + f_{\text{a}}(u, v)$   
      endif  
     $V_{\text{f}} \leftarrow V_{\text{fr}} + V_{\text{fa}}$   
     $V_{\text{p}} \leftarrow V_{\text{p}} + \min(|V_{\text{f}}|, S)$   
  endfor  
   $T \leftarrow \text{cool}(T)$   
endwhile
```

先计算节点受到的斥力和引力,进而计算节点受到的合力,然后根据合力和位移阈值得到节点移动距离。设定合适的冷却函数对算法的运行效率至关重要,一般由平衡距离和位移阈值来决定,实际应用中往往设定固定的迭代次数作为迭代终止条件。拓布局的理想状态是节点平均分布在 $W \times H$ 区域内,每个节点周围有一个半径为 k 的空间。

3 具体实现

方案的实现环境如表 2 所示。

表 2 方案实现环境

硬件环境	软件环境
TOSHIBA T852	Win7 系统, Eclipse, NetworkX, Mayavi2

在 Eclipse 中搭建好 Python 编程环境,安装好网络拓扑可视化软件包 NetworkX,利用 NetworkX 通过 Python 编程调用函数对 NECB 算法和 FR 算法进行实现。

复杂网络拓扑数据这里选择 NetworkX 中已经集成的 HK 网络, HK 模型是一种典型的高聚类系数无标度小世界模型^[14]。从表 1 中可以看出 NECB 算法能有效压缩其网络规模。利用 NetworkX 随机生成一个拥有 500 个节点的 HK 网络,其中 $m=6$,网络有 2 953 条边,压缩前的网络拓扑如图 8 所示。

没有经过压缩的网络拓扑很难观察到有效的结构信息,利用 NECB 算法压缩后的网络拓扑有 23 个节点和 83 条边,重要边的保存率为 0.423 7 后,采用 FR 算法布局得到的压缩图如图 9 所示。

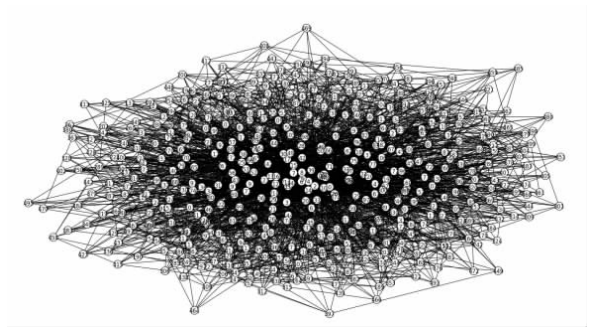


图 8 压缩前的 HK 网络拓扑

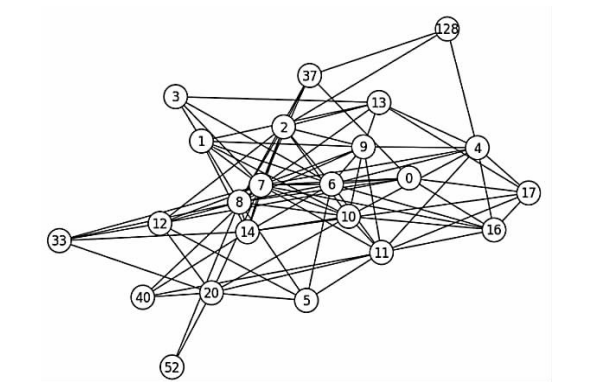


图 9 压缩后的 HK 网络拓扑

压缩后的网络拓扑能基本呈现出原始 HK 网络拓扑的结构,另外, NetworkX 的呈现界面还支持基本的交互,可利用鼠标或键盘对网络拓扑进行移动或缩放,满足对特定节点或边的观察需求。

4 结束语

文中主要介绍了一种复杂网络拓扑可视化方案及其相关技术,详细说明了 NECB 网络拓扑压缩算法和 FR 网络拓布局算法的原理和流程,并利用 NetworkX 软件对 HK 模型复杂网络拓扑进行了呈现。最终的呈现结果表明该方案能展现出复杂网络拓扑的基本整体结构,为分析复杂网络的结构特性提供支持。

参考文献:

[1] 汪小帆,李翔,陈关荣. 复杂网络理论及其应用[M]. 北京:清华大学出版社,2006.

[2] Gilbert A C, Levchenko K. Compressing network graphs[C]// Proceedings of the LinkKDD workshop at the 10th ACM conference on KDD. [s.l.]:[s.n.], 2004.

[3] Holten D, van Wijk J J. Force-directed edge bundling for graph visualization[J]. Computer Graphics Forum, 2009, 28(3):983-990.

[4] 陈为,张嵩,鲁爱东. 数据可视化的基本原理与方法[M]. 北京:科学出版社,2013.

[5] Eades P. A heuristics for graph drawing[J]. Congressus Numerantium, 1989, 42:146-160.

4 结束语

三轴加速度计可以从人体运动得到人的行为模式,是越来越普遍使用的可穿戴式传感器。使用这种加速度计可以开发可靠和可扩展的行为分类系统,在实际使用中表现良好。然而,对于不同强度级别的行为,也需要考虑到系统是否具有强度级别无关的行为分类能力。文中给出的随机逼近框架能够从几个已知的强度级别推断未知的强度级别,实验结果显示:在强度无关的行为分类能力方面,随机逼近框架胜过其他几种流行的分类算法。随机逼近框架使用的两种聚类技术中,GMM 的结果优于 k -均值。随机逼近模型在许多医疗应用,如计算能量消耗、环境意识以及健康有关的应用中是非常有效的。

参考文献:

[1] Patel S, Park H, Bonato P, et al. A review of wearable sensors and systems with application in rehabilitation[J]. Journal of Neuroengineering and Rehabilitation, 2012, 9(12): 1-17.

[2] Freedson P S, Lyden K, Kozey-Keadle S, et al. Evaluation of artificial neural network algorithms for predicting METs and activity type from accelerometer data; validation on an independent sample[J]. Journal of Applied Physiology, 2011, 111(6): 1804-1812.

[3] Strath S J, Kaminsky L A, Ainsworth B E, et al. Guide to the assessment of physical activity: clinical and research applications; a scientific statement from the American heart association[J]. Circulation, 2013, 128(20): 2259-2279.

[4] 朱琳, 陈佩杰. 能量消耗测量方法及其应用[J]. 中国运动医学杂志, 2011, 30(6): 577-582.

[5] 孙泊, 刘宇, 庄涛, 等. 基于腰部加速度计的行走能耗建模实验研究[J]. 体育科学, 2013, 33(4): 36-41.

[6] 吉喆, 崔玉鹏, 李林, 等. 加速度计在能量代谢检测中的应用现状[J]. 中国运动医学杂志, 2012, 31(9): 839-843.

[7] Gabriel K P, Matthews K A, Pérez A, et al. Self-reported and

accelerometer-derived physical activity levels and coronary artery calcification progression in older women: results from the Healthy Women Study[J]. Menopause, 2013, 20(2): 152-161.

[8] 朱国忠, 韦彩虹, 潘敏. 基于三维加速度传感器的人体运动能耗检测算法的研究[J]. 传感技术学报, 2011, 24(8): 1217-1222.

[9] Leppanen J, Eronen A. Accelerometer-based activity recognition on a mobile phone using cepstral features and quantized gmms[C]//Proc of 2013 IEEE international conference on acoustics, speech and signal processing. Vancouver: IEEE, 2013: 3487-3491.

[10] 李明爱, 陆婵婵, 杨金福. 基于改进 CSSD 的脑电信号特征提取方法[J]. 北京工业大学学报, 2013, 39(7): 1021-1028.

[11] 周涛, 陆惠玲. 数据挖掘中聚类算法研究进展[J]. 计算机工程与应用, 2012, 48(12): 100-111.

[12] 张春凯, 王丽君. 基于遗传算法的一种改进的 K-均值聚类算法[J]. 计算机工程与应用, 2012, 48(26): 144-147.

[13] 胡庆辉, 丁立新, 陆玉靖, 等. 一种快速、鲁棒的有限高斯混合模型聚类算法[J]. 计算机科学, 2013, 40(8): 191-195.

[14] Zhuang Yong, Chin W S, Juan Y C, et al. A fast parallel SGD for matrix factorization in shared memory systems[C]//Proceedings of the 7th ACM conference on recommender systems. [s. l.]: ACM, 2013: 249-256.

[15] Vijay A, Ling K V, Fane A G. Reserve management and real time optimization for a solar powered Membrane Distillation Bio-Reactor water recycling plant via convex optimization[J]. Renewable Energy, 2013, 60: 489-497.

[16] Alshurafa N, Xu Wenyao, Liu J J, et al. Robust human intensity-varying activity recognition using Stochastic Approximation in wearable sensors[C]//Proc of 2013 IEEE international conference on body sensor networks. Cambridge: IEEE, 2013: 1-6.

[17] 张娟, 毛晓波, 陈铁军. 运动目标跟踪算法研究综述[J]. 计算机应用研究, 2009, 26(12): 4407-4410.

(上接第 82 页)

[6] 胡长爱, 朱礼军. 复杂网络软件分析与评价[J]. 数字图书馆论坛, 2010(5): 33-39.

[7] Hagberg A A, Schult D A, Swart P J. Exploring network structure, dynamics, and function using NetworkX[C]//Proc of the 7th python in science conference. [s. l.]: [s. n.], 2008.

[8] Fruchterman T M J, Reingold E M. Graph drawing by force-directed placement[J]. Software: Practice and Experience, 1991, 21(11): 1129-1164.

[9] 高随祥. 图论与网络流理论[M]. 北京: 高等教育出版社, 2009.

[10] Brandes U. On variants of shortest-path betweenness centrality

and their generic computation[J]. Social Networks, 2008, 30(2): 136-145.

[11] 徐超群. 基于复杂网络的可视化方法研究及其应用[D]. 北京: 北京邮电大学, 2008.

[12] 朱志良, 林森, 崔坤, 等. 基于复杂网络社区划分的网络拓扑结构可视化布局算法[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2011, 23(11): 1808-1815.

[13] 杨博, 刘大有, LIU Jiming, 等. 复杂网络聚类方法[J]. 软件学报, 2009, 20(1): 54-66.

[14] Holme P, Kim B J. Growing scale-free networks with tunable clustering[J]. Physical Review E, 2002, 65(2): 026107.

复杂网络拓扑可视化方案设计与实现

作者: [张畅](#), [谢钧](#), [胡谷雨](#), [段伟伟](#), [ZHANG Chang](#), [XIE Jun](#), [HU Gu-yu](#), [DUAN Wei-wei](#)
作者单位: [解放军理工大学 指挥信息系统学院, 江苏 南京, 210000](#)
刊名: [计算机技术与发展](#) 
英文刊名: [Computer Technology and Development](#)
年, 卷(期): 2014(12)

引用本文格式: [张畅](#). [谢钧](#). [胡谷雨](#). [段伟伟](#). [ZHANG Chang](#). [XIE Jun](#). [HU Gu-yu](#). [DUAN Wei-wei](#) [复杂网络拓扑可视化方案设计与实现](#) [期刊论文] - [计算机技术与发展](#) 2014(12)