

网络拓扑可视化研究综述*

张伟明, 罗军勇, 王清贤

(解放军信息工程大学 信息工程学院 网络工程系, 郑州 450002)

摘要: 深入分析了网络拓扑可视化问题, 回顾了目前主要的研究成果, 并从网络拓扑模型、绘图和信息可视化三方面对比了它们之间的异同, 指出了当前研究中存在的不足和后期的研究重点。

关键词: 网络拓扑; 模型; 信息可视化; 绘图

中图分类号: TP393.08 文献标志码: A 文章编号: 1001-3695(2008)06-1606-05

Survey on network topology visualization

ZHANG Wei-ming, LUO Jun-yong, WANG Qing-xian

(Dept. of Network Engineering, Institute of Information Engineering, PLA Information Engineering University, Zhengzhou 450002, China)

Abstract: This paper penetrated into the problem of network topology visualization, reviewed most of the research, and compared them from the following aspect: modeling, graph drawing, and information visualization. Finally, discussed the deficiency of the former work and put forward some suggestions for future research work.

Key words: network topology; model; information visualization; graph drawing

0 引言

网络拓扑信息在网络管理、网络安全研究、网络性能分析以及网络模型研究等方面占有举足轻重的地位, 如何获取、分析和利用网络拓扑信息也是众多研究所关注的一个热点。网络拓扑可视化作为分析利用网络拓扑信息的重要辅助手段, 其主要目标就是将目标网络的节点和连接状况完整清晰地展现在人们眼前, 为人们了解、分析目标网络的整体状况提供直观素材和操作平台。这不仅有助于人们对其进行观测分析, 更重要的是, 它将帮助人们发现存在于网络拓扑中的潜在规律。

网络拓扑可视化的需求主要来源于以下方面: a) 清晰直观地反映网络运行状况, 辅助人们对网络各方面性能进行评估, 掌握其发展动态, 并为其制定有效的管理策略提供依据; b) 帮助人们更清晰地认识和发现存在于网络中的内在规律; c) 网络拓扑模型需要以可视化方式来加以验证。

网络拓扑可视化主要涉及网络拓扑模型、信息可视化和绘图三个研究领域。其中, 网络拓扑模型研究为实现网络拓扑可视化提供数据组织和处理依据; 信息可视化则主要为实现网络拓扑可视化目标提供基本的方法和参考; 图布局技术则是在实现网络拓扑布局时所需重点研究的内容, 同时也是网络拓扑可视化的核心问题。它们之间的关系可用图 1 来描述。

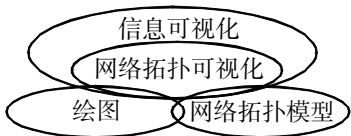


图 1 网络拓扑可视化问题分析

本文分析了网络拓扑可视化问题, 回顾并对比分析了目前主要的研究成果, 指出了当前研究中存在的不足和后期的研

究重点。

1 网络拓扑模型

网络拓扑模型研究主要涉及网络测量、图论、算法设计、统计学、数据挖掘、可视化以及数学建模等多个研究领域^[1]。主要研究的问题包括: a) 如何获得一份完整而准确的网络拓扑数据; b) 如何对网络拓扑特征进行描述; c) 如何自动生成能够模拟现实网络环境的网络拓扑。

这三个问题也是网络拓扑模型三个研究方向——网络拓扑测量、网络拓扑建模和构造网络拓扑生成器的基本出发点。其中, 网络拓扑测量是网络拓扑建模的基础, 而构造网络拓扑生成器可视为网络拓扑建模的软件实现。

有关网络拓扑建模的研究自网络诞生以来就从未停止过, 产生的知名模型主要有随机型(Waxman 模型^[2])、层次型(Tiers 模型^[3]、Transit & Stub 模型^[4])和幂率型(Power-Law 模型^[5])。这些模型都从宏观上对网络的结构特征进行了描述。此外, 在网络拓扑建模研究过程中, 人们还发现了从不同角度刻画网络拓扑特征的度量标准, 如平均路径长度、聚类系数^[6]、膨胀因子、恢复度、扭曲度^[7]、平均偏心度、最大团尺寸和正规拉普拉斯谱^[8]等。这些度量标准为人们更加深入地研究网络拓扑特征, 发现网络的潜在规律提供了有力的工具基础。

网络拓扑模型是网络拓扑可视化研究所关注的核心内容。首先, 它描述的是网络拓扑最本质、最核心的特征, 从根本上回答了“由人们所亲手缔造的网络究竟是什么”的问题。作为网络研究重要的辅助手段, 网络拓扑可视化应以能够准确反映网络拓扑模型所描述的网络特征为重要目标, 从而发挥其正确引

收稿日期: 2007-07-02; 修回日期: 2007-09-28 基金项目: 国家“863”计划资助项目(20031AA146010)

作者简介: 张伟明(1978-), 男, 博士研究生, 主要研究方向为网络安全(amzw@tom.com); 罗军勇(1964-), 男, 教授, 硕导, 主要研究方向为网络安全; 王清贤(1960-), 男, 教授, 博导, 主要研究方向为算法设计与分析、网络安全。

导人们认识和研究网络的作用。其次,网络拓扑模型研究过程中所产生的模型和度量标准为网络拓扑可视化工具的设计提供了直接的数据组织和处理依据。

2 信息可视化技术

基于计算机的信息可视化是多种传统科学的集合,包括计算机科学、心理学、语言学、图形设计和艺术等。其中,贯穿信息可视化技术的计算机科学主要是计算机图形学和人机交互学。信息可视化的目标就是帮助人们增强认知能力。研究认为,信息可视化主要通过以下手段来增强用户对数据的认知能力^[9]:扩大人们可用的存储量和可处理的资源量、减少对信息的搜索;提高人们对模式的发掘能力;调动感知推理操作;把感知注意用于监控;把信息编码为可操作的元素。

信息可视化的需求主要来源于以下方面: a) 当目标数据过于复杂时,用于浏览观察目标信息; b) 当目标数据不够直观,不利于分析时,用于辅助分析规划; c) 当专业领域信息难以让常人理解时,用于辅助沟通。

网络拓扑信息就是属于这一类数据量大、组织关系复杂、较抽象的专业领域信息。网络拓扑可视化可以视为信息可视化的一个应用特例。信息可视化研究中的理论和方法,以及信息可视化方面的研究成果都可以直接应用于网络拓扑可视化,如图形编码、注意力模型、印象图(mental map) 等;再如,在众多的信息可视化技术应用中,产生的诸多有效的可视化方法,如颜色编码、形状区分、导航、文本+焦点、非线性放大、动态交互、视角切换等,这些方法都可以为网络拓扑可视化提供重要参考。

3 绘图技术研究

3.1 绘图问题及其难点

绘图技术^[10]是信息可视化与应用数学的一个交叉领域,主要研究从图到几何空间的映射关系,用形式化方法描述如下^[11]:对于图 $G=(V,E)$,有 $d:G\rightarrow R^3$ (或 $d:G\rightarrow R^2$)。其中: $d(v\in V)=\{X(x),Y(y),Z(z)\};d(e\in E)=\{(e_1,e_2),(e_2,e_3),\cdots,(e_{n-1},e_n)\}$ 。通俗地说,就是为每个节点分配二维或三维坐标,为每条边指定弯曲度或折点。

绘图技术的研究内容十分丰富,这主要是因为根据不同的实际应用,人们对绘图的基本要求也相应不同,如对节点的大小和形状、连接的宽细和弯曲度以及整体绘制空间大小的限制等。因此,绘图技术研究往往是针对特定要求下的特定图,如普通图、有向图、平面图、层次图、树图等。与此同时,还需考虑特定领域的不同数据特性。

事实上,对不同类型图采用的不同布局方法都会面临不同的难题。总的来说,绘图技术研究中的难题主要来源于以下两方面:

a) 布局规模。当图的规模变大时,会给绘图带来诸多困难:一方面,大量的节点和连接可能会引起算法性能上的问题;另一方面,即使能够完成布局,但因为布局空间有限,布局结果将布满整个平面而变得毫无意义。多数绘图算法均在这方面存在严重制约。

b) 布局约束。可以分为两种约束,一种是来自美学标准,另一种则是实际要求,但其实质是一致的。令图 $G=(V,E)$ 的节点坐标为 (X,Y) , $f(X,Y)$ 为满足约束的目标函数,图的布局问题则转换为求满足 $\min[f(X,Y)]$ 时 (X,Y) 的取值问题。这是典型的组合优化问题^[12],是 NP 完全问题。

3.2 网络拓扑可视化中的图布局算法

绘图问题是网络拓扑可视化难以回避的问题之一,尤其是网络拓扑丰富的内在特性而带来的复杂约束关系以及网络拓扑规模的不确定性,将给网络拓扑可视化中的绘图问题带来双重困难。

从网络拓扑可视化的角度来看,绘图算法大致可分为两大类,即物理布局和逻辑布局。物理布局中最具代表性的就是地理位置映射方法。严格说来,这种方法并不属于绘图研究的范围,它只是简单地将节点的地理位置信息解析为与之对应的布局坐标。地理位置映射对于与地理位置信息相关的网络拓扑可视化来说有着重要意义,但同时也使这种方法局限于主干网络拓扑的可视化。Mapnet、MantaRay 都是以平面方式解析地理信息;而 MBone^[13]则是在三维球体上予以解析。

逻辑布局有着地理信息映射所不具备的优势,它可以按需为节点分配布局空间,而无须考虑它们在实际地理位置上的冗余和交错。更重要的是,这种方法可以让研究者在实现布局的过程中,充分利用与问题域无关的图算法,也可以让他们集中关注图自身的内在特性。逻辑布局是绘图研究的核心内容,在这一分支中产生了非常丰富的算法。

1) 树型布局算法

有关树的布局已经被证明可以在多项式时间内完成,这使得解决这类问题比解决图布局的问题要简单得多。因此,在图布局技术中,往往先考虑将复杂的图转换为树,在完成树的布局后,再以树作为主干,将树中未包含的边添加到布局结果中。在网络拓扑可视化中也有着众多的以树布局算法为基础的工具,如锥树^[14]、Tamara Munzner 的 H3Viewer^[15]系统;Bell 实验室的 Internet 可视化项目也采用了最小生成树布局方法来处理大规模网络拓扑。

采用树型布局算法作为网络拓扑布局的基本出发点有两个:首先,树型布局算法效率高、布局速度快;其次,树型结构与网络拓扑模型中的层次型相吻合,采用树型布局算法在一定程度上可以体现网络拓扑的层次特性。

2) 射线布局算法

该方法在得到图的生成树后,将其根节点置于中心位置,按照树的层次结构,依次将其布局在以根节点为圆心的同心圆上。射线布局算法的实质是树型布局的极坐标形式,但就布局效果来说,射线布局更容易被人们接受。射线布局算法的典型代表是 NicheWorks^[16]。

3) 层次布局算法

层次布局算法着眼于图内部的层次特性。该方法按照一定的标准将图进行分层,先确定各节点的 Y 轴坐标;接下来,以减少边的交叉数为目标优化节点的 X 轴的排列。树型布局算法可以视为层次布局算法的一个特例。

层次布局算法的典型代表是 Sugiyama 算法^[17]。该算法是

针对有向连通图的,算法被分为四个子算法:环检测算法、层次算法、交叉最小化算法和走线算法。目前,从公开的资料中还未发现有研究将 Sugiyama 算法直接应用于网络拓扑可视化。这是因为该算法设计复杂,实现相对困难。但 Sugiyama 的整体算法步骤为网络拓扑的层次布局提供了参考。

4) 直交布局算法

直交布局算法(也称为网格布局算法)为图布局提供了一种不同的风格。布局结果中,节点之间的连线均与横纵坐标轴平行,这使整体布局效果显得规整,可读性强。直交布局算法对于需要展现详细连接状况的小规模网络拓扑可视化来说有着重要意义。这类应用多出现于网络管理软件,如 SuperJA-NET 和 Crosspost 等。

5) 力导向布局算法^[18]

力导向布局算法是图布局研究中的重要研究成果,也是最为知名的图布局算法之一。该算法由 P. Eades 于 1984 年提出。其基本思想是模拟力学平衡原理,将图中的节点模拟为钢环,连接则模拟为弹簧;布局的过程则是不断调整钢环的位置,使钢环和弹簧所组成的物理系统达到力学平衡状态。

力导向布局算法在网络拓扑可视化中有着重要应用,但客观来说,纯粹的力导向算法并不是作为网络拓扑布局的最佳选择。原因是该算法以模拟物理系统为主要方法,最终体现的也是复杂物理系统的能量平衡,而网络拓扑的内在特性却与之关联甚少。此外,多数研究指出,力导向布局算法只适用于规模较小的图,对于大型图,算法的效率难以让人满意。因此,研究者们利用力导向布局算法针对网络拓扑布局时,往往需要对其作适当改进和优化,或是局部使用。从目前公开的资料来看,这些改进和优化多数针对布局效率,如改善初始布局^[6]、简化能量计算^[19]、减少迭代次数^[20]、优化算法终止条件以加快算法的收敛速度^[6]等。

6) 混合布局算法

混合布局算法的主要思想是将布局过程拆解为不同的步骤,或将布局区域分块;然后在不同的步骤、不同的布局区域采用不同的布局算法,以求在整体上和局部上都尽可能地满足约束条件。此外,混合布局算法由于采用了分治策略,总体上降低了问题规模,其布局效率也往往优于单一的布局算法,尤其是启发式算法。

混合布局算法作为图布局算法研究的热点之一,在网络拓扑可视化中有着重要应用。例如 VLNT 就是将 ISOM 算法、插值算法和力导向算法分阶段应用;再如 RDC^[21]就是先利用聚类算法将网络拓扑中的节点加以分类,然后再以力导向算法对其进行分别布局。

采用混合布局算法作为网络拓扑布局方法的关键问题就是要解决节点的聚类问题,而且这种聚类方法是以网络拓扑自身特性为依据才能使布局效果达到体现网络拓扑内在特性的要求。

7) 动态交互布局

动态交互布局是图布局算法研究的重要方向之一。其基本出发点是在现实应用中图的大小、形态会随时间动态地发生变化,这就需要布局方法能够动态适应图的变化,且最大限度

地保持布局稳定;另一方面,完全的自动布局不能满足人们的要求,通过在布局过程中引入人工干预的方法使得布局效果更接近人们的要求。动态交互布局的关键就是有效利用前一次布局的结果,降低单次布局的规模以提高效率,并保持图动态变化过程中的印象图。目前,公开的研究中针对网络拓扑可视化的动态交互布局系统还很少见,gnuTellaVision^[22]是为数不多的系统之一。

此外,还有很多研究借鉴组合优化问题的求解方法来解决图布局问题。这类方法有遗传算法^[23~25]、模拟退火算法^[26]等。它们对网络拓扑可视化中的网络拓扑布局均有重要的参考作用。

4 研究现状及动态

目前,已有很多网络拓扑可视化方面的研究和成果。下面以研究机构为主线,分别介绍他们在网络拓扑可视化研究中所做的工作。

1) CAIDA^[27]

CAIDA 是一个以 Internet 数据采集和分析为主要研究对象的组织。该组织针对网络拓扑可视化问题做了许多卓有成效的工作,其 Atlas 项目就是专门进行相关研究而设立的。他们开发的网络拓扑可视化工具包括 Mapnet、MantaRay、Plankton、Otter、Skitter、Walrus 等。这些工具极大地丰富了网络拓扑可视化工具集。此外,其研究成果和方法也为后续的网络拓扑可视化研究提供了很好的借鉴。

2) SCAN. ISI. USC^[28]

该小组在开发其网络拓扑发现工具时并没有直接就网络拓扑可视化问题作更深入的研究,而是直接利用了可视化工具 IGN2PCI 提供的图布局输入/输出接口。其产生的拓扑图为静态图像,无交互功能。

3) CNRG

CNRG 解决网络拓扑可视化的问题时,只公开了一个简单的方法,且其目标主要是针对小型主干网的拓扑结构。他们将其布局方法概括为基于跳数的等高线映射^[29],其思想是以探测源为起点,将跳数相同的节点等距在同一等高线依次排开;在此基础上,连接图中的相关节点。其可视化效果非常有限。

4) Bell 实验室

Bell 实验室^[30,31]针对网络测量和分析收集了大量 Internet 和 Lucent 网络路径信息。这使得其可视化工作可以充分利用这些路径获取时所保留的跳数信息。其布局算法借鉴了力导向布局算法的基本思想,但修改了原始模型中的斥力计算公式,更重要的是布局时并不是一次性显示所有节点,而是以跳数为依据分步骤显示,这使其每次计算的规模大大减小,且反映了增量布局的过程;针对规模更大的网络拓扑布局时,他们使用了最小生成树布局方法。

5) 墨尔本大学

VLNT^[32]主要用于大规模网络拓扑的可视化,该工具的一个重要贡献是首次采用了混合布局算法,并改进了算法终止条件,大大提高了布局效率,能对 1 500 个节点规模的拓扑进行高效布局。虽然该工具在布局速度和规模上有所改进,但布局

结果并没有很好地体现 Internet 的内在特性。

6) NLANR^[33]

为更方便地进行网络测量和分析,NLANR 开发了一个用于网络性能可视化的工具 CiChild^[34]。该工具充分利用了三维可视化技术,其可视化效果令人满意,但其布局需要预先通过手工指定。

7) 罗马大学

罗马大学开发的网络拓扑可视化工具是 HERMES^[35]。该工具基于 GDToolkit 库提供的图布局算法实现了对 AS 层网络拓扑的直交布局 and 动态交互。他们将其布局过程细化为五个步骤: a) 将节点度为 1 的节点去除; b) 将得到的图平面化; c) 将平面化后的图采用直交布局算法进行布局; d) 将布局结果进行压缩处理,使布局面积更小; e) 插入步骤 a) 移除的节点。在此基础上,他们针对用户的交互操作提供了动态算法。

8) DELIS^[36]

DELIS 是欧洲 FP6 资助的一个项目,其主要工作就是研究包括 Internet 在内的复杂网络系统的自动管理和自动修复的机制。DELIS 开发的网络拓扑可视化工具是 BGPlay,主要应用对象是 AS 层拓扑,其布局算法以力导向算法为基础进行了改进。

9) 伯克利大学

gnuTellaVision 主要面向的是应用层网络拓扑可视化,其目标是开发 P2P 网络文件共享的可视化接口。该工作最重要的特点之一就是采用动态布局方法,初步实现了应用层网络拓扑的动态布局,但在布局效率和规模方面均有待提高。

以上研究多数都是针对大中型网络拓扑的可视化。相比而言,小规模网络拓扑可视化工具往往致力于全面、准确、详细地反映目标网络中各种设备、链路的属性信息,使用户能够直接了解网络结构及网络设备的细节。这一类工具一般采用直观却又相对复杂的布局算法。为了更多地表现设备及链路的详细信息,这类系统在绘制时往往采用复杂的抽象模型或图标来表示节点,并允许使用动画等多种特殊绘制效果来增强用户的认知能力。

综上所述,网络拓扑可视化研究中已经出现了一些阶段性的成果。这些成果虽然目标大致相同,但形式各异,在效果上很难说清谁优谁劣。表 1 对比了一些有代表性的网络拓扑可视化工具在网络拓扑模型、信息可视化和图布局方面的异同。结合这些研究成果的可视化效果,笔者对网络拓扑可视化的研究现状给予以下评价:

- a) 目前的网络拓扑可视化工具多数是针对特定层次的网络拓扑而设计的,缺乏对不同层次、不同类型拓扑的自适应能力;
- b) 多数网络拓扑可视化中的图布局算法并没有充分考虑并利用网络拓扑的内在特性,而只是针对一些通用的布局算法,在效率和布局效果上进行改进;
- c) 在现有的网络拓扑可视化研究中,还缺乏动态交互布局的成果。

5 结束语

网络拓扑可视化问题的研究难点主要来源于以下方面: 网

络自身的复杂性; 缺乏进行系统研究的方法论。

网络自身的复杂性直接导致了人们对网络拓扑模型的认识问题,这使得在对其可视化时缺乏确定的目标。至今,人们仍不能就 Internet 拓扑模型给出一个准确的答案,这必然导致人们难以在脑中对其形成一个清晰的整体印象; 对于已有的模型也缺乏概念性认识,如 Power-Law 网络在直观上应表现为什么样的形式才符合人们的认知习惯。此外,网络规模的不确定性也是网络拓扑可视化中解决绘图问题时所必须面对的问题。

表 1 网络拓扑可视化工具中的网络拓扑模型、可视化方法与布局算法							
工具	年份	来源	主要应用	实现模型	基本拓扑模型	主要的可视化方法	采用的图布局算法
Mapnet	1997	CAIDA	ISP 主干拓扑可视化	实际模型	实际模型	地图	地理位置映射
Other	1998	CAIDA	网络数据的可视化,包括拓扑、负载、性能和路由	图	随机型	手工调整,增量	基于根节点的射线布局算法
H3Viewer	1998	Tamara Munzner	以大型类层次图为主,可适用于较稀疏的其他图	类层次图 (quasi-hierarchical)	层次型	标签,视角变换,非线性放大	树型布局算法
CiChild	2000	NLANR	网络性能测量和分析	图	随机型	虚拟现实,三维	预先手工设定
gnuTella-Vision	2001	伯克利大学	P2P 网络拓扑的可视化	图	随机型	动态,交互,标签	射线布局算法、动态布局算法
HERMES	2002	罗马大学	AS 层网络拓扑	图	随机型	直交,动态,交互	平面化算法、直交布局算法、交互算法
RDC	2003	特拉维夫大学	AS 层网络拓扑	簇状图 (clustered graph)	幂率型	形状,标签	聚类算法、以力导向算法为基础的混合布局算法
VLNT	2004	墨尔本大学	AS 层拓扑,可适用于其他层拓扑	簇状图	随机型	图元操作	混合布局算法
BGPlay	2006	DELIS	AS 层网络拓扑	图	随机型	标签,动画	改进的力导向算法

网络拓扑可视化研究虽然已取得了众多成果,但仍缺乏系统的方法论。尤其在如何将网络拓扑特性与图布局算法以及可视化手段的结合方面,显得无章可循。

综上所述,今后网络拓扑可视化的研究路线主要包含以下三方面: a) 通过深入分析网络拓扑模型研究所产生的各种模型及度量标准、布局算法的设计方法以及可视化方法之间的关系,为网络拓扑可视化研究探求一套系统的研究方法; b) 加大绘图算法的研究力度,尤其是存在复杂约束条件的图布局算法; c) 积极探索新的可视化方法,尝试以不同的表达方式来描述网络拓扑,以获得人们较高的认知认同。

参考文献:

[1] 张宇,张宏莉,方滨兴. Internet 拓扑建模综述[J]. 软件学报, 2004,15(8): 1220-1226 .

[2] WAXMAN B M. Routing of multipoint connections[J]. IEEE Journal in Communications, 1988,6(9): 1617-1625 .

[3] DOAR M B. A better model for generating test networks[C] //Proc of GLOBECOM’ 96. London: IEEE,1996: 86-93 .

[4] ZEGURA E W, CALVERT K L, DONAHOO M J. A quantitative comparison of graph-based models for Internet topology[J]. IEEE / ACM Trans on Networking, 1 997,5(6): 770-783 .

[5] FALOUTSOS M, FALOUTSOS P, FALOUTSOS C. On Power-Law relationships of the Internet topology[J]. ACM SIGCOMM Computer Communication Review, 1999,29(4): 251-262 .

[6] WATTS D, STROGATZ S. Collective dynamics of small-world networks[J]. Nature, 1998,393(6684): 440-442 .

[7] TANGMUNARUNKIT H, GOVINDAN R, JAMIN S, *et al.* Network topology generators: degree-based VS structural[J]. ACM SIGCOMM Computer Communication Review, 2002,31(4): 147-159 .

[8] GKANTSIDIS C, MIHAIL M, ZEGURA E. Special analysis of Internet topologies[C] //Proc of IEEE INFOCOM 2003. San Francisco: IEEE, 2003: 364-374.

[9] 刘玮. 由认知到感知: 谈信息可视化技术[EB/OL] . (2003) . <http://www.e-works.net.cn/ewkArticles/xxhyl.htm>.

[10] ATTISTA 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.

[11] TOLLIS I G, Di BATTISTA G, EADES P, *et al.* Graph drawing: algorithms for the visualization of graphs[M] . New York: Prentice Hall, 1999.

[12] IAZ J, PETIT J, SERNA M. A survey of graph layout problems[J] . ACM Computing Surveys, 2002, 34(3) : 313-356.

[13] MUNZNER T, HOFFMAN E, CLAFFY K, *et al.* Visualizing the global topology of the MBone[C] //Proc of IEEE Symposium on Information Visualization. San Francisco, California: [s. n.] , 1996.

[14] LOMBARDONI A. The cone tree layout algorithm[EB/OL] . <http://www.inf.ethz.ch/personal/lombardo/archives/da/node9.html>.

[15] MUNZNER T. Drawing large graphs with H3Viewer and site manager[C] //Proc of GD' 98. 1998: 384-393.

[16] GRAHAM J W. Niche works-interactive visualization of very large graphs[C] //Proc of GD' 97. 1997.

[17] SUGIYAMA K, TAGAWA S, TODA M. Methods for visual understanding of hierarchical systems[J] . IEEE Trans on Systems, Man, and Cybernetics, 1981, 11(2) : 109-125.

[18] EADES P A. A heuristic for graph drawing[J] . Congressus Numerantium, 1984, 42: 149-160.

[19] FRUCHTERMANN T, REINGOLD E. Graph drawing by force-directed placement[J] . Software-practice and Experience, 1991, 21(11) : 1129-1164.

[20] RODGERS P, MUTTON P. Visualizing weighted edges in graphs[C] //Proc of the 7th International Conference on Information Visualization. 2003.

[21] SAGIE G, WOOL A. A clustering approach for exploring the Internet structure, EES2003-7[R] . [S. l.] : Tel Aviv University, 2003.

[22] DHAMIJA R, FISHER D, YEE K P. gnuTellaVision: real-time visualization of a peer-to-peer network[EB/OL] . <http://www.sims.berkeley.edu/~rachna/courses/infviz/gtv/paper.html>.

[23] 黄竞伟, 康立山, 陈毓屏. 一个新的无向图画图算法[J] . 软件学报, 2000, 11 (1) : 138-142.

[24] BARRETO A M S, BARBOSA H J C. Graph layout using a genetic algorithm[C] //Proc of International Conference on Neural Networks. 2000: 179-184.

[25] 孙炜, 吴伟民, 陈志峰. 基于遗传模拟退火算法的图的三维可视化[J] . 广东工业大学学报, 2002, 19(1) : 37-41.

[26] MONIEN B, RAMME F, SALMEN H. A parallel simulated annealing algorithm for generating 3D layouts of undirected graphs[C] //Proc of International Symposium on Graph Drawing. 1995: 369-408.

[27] [EB/OL] . <http://www.caida.org/tools/visualization/index.xml>.

[28] [EB/OL] . <http://www.isi.edu/scan/mercator/mercator.html>.

[29] SIAMWALLA R, SHARMA R, KESHAV S. Discovering Internet topology[C] //Proc of INFOCOM. 1999.

[30] BURCH H, CHESWICK B. Mapping the Internet[J] . IEEE Computer, 1999, 32(4) : 97-98.

[31] CHESWICK B, BURCH H, BRANIGRAN S. Mapping and visualizing the Internet[C] //Proc of USENIX Annual Technical Conference. 2000.

[32] AU S C, LECKIE C, PARHAR A, *et al.* Efficient visualization of large routing topologies[J] . International Journal of Network Management, 2004, 14(2) : 105-118.

[33] [EB/OL] . <http://nlanr.net/>.

[34] BROWN J A, MCGREGOR A J, BRAUN H W. Network performance visualization: insight through animation[C] //Proc of PAM2000. 2000.

[35] CARMIGNANI A, Di BATTISTA G, DIDIMO W, *et al.* . Visualization of the high level structure of the Internet with hermes[J] . J of Graph Algorithms and Applications, 2002, 6(3) : 281-311.

[36] [EB/OL] . <http://delis.udp.de/index-2.html>.

(上接第 1605 页)

[16] LLISON C, FRANTZ B, LAMPSON B, *et al.* Request for comments 2693, SPKI certificate theory[S] . Sterling, VA: Internet Engineering Task Force, 1999.

[17] LINN J, NYSTROM M. Attribute certification: an enabling technology for delegation and role-based controls in distributed environments[C] //Proc of the 4th ACM Workshop on Role-based Access Control. Virginia: ACM Press, 1999: 121-130.

[18] CHADWICK D W, OTENKO O. The PERMIS X.509 role-based privilege management infrastructure[C] //Proc of the 7th ACM Symposium on Access Control Models and Technologies. Monterey: ACM Press, 2002: 135-140.

[19] 许长枫, 刘爱江, 何大可. 基于属性证书的 PMI 及其在电子政务安全建设中的应用[J] . 计算机应用研究, 2004, 21(1) : 119-122.

[20] CANOVAS O, GOMEZ A F. Delegation in distributed systems: challenges and open issues[C] //Proc of the 14th International Workshop on Database and Expert Systems Applications. Washington DC: IEEE Computer Society Press, 2003: 499-503.

[21] 张志勇, 普杰信. 委托授权在 PMI 体系架构中的研究与应用[J] . 计算机工程, 2006, 32(5) : 152-154.

[22] LI Ning-hui, FEIGENBAUM J, GROSOFF N B. A logic-based knowledge representation for authorization with delegation[C] //Proc of IEEE Computer Security Foundations Workshop. Washington DC: IEEE Computer Society Press, 1999: 162-174.

[23] LI Ning-hui, MITCHELL J C, WINSBOROUGH W H. Design of a role-based trust-management framework[C] //Proc of IEEE Symposium on Security and Privacy. Washington DC: IEEE Computer Society Press, 2002: 114-130.

[24] LI Ning-hui, MITCHELL J C. RT: a role-based trust-management framework[C] //Proc of DARPA Information Survivability Conference and Exposition (DISCEX III) . Washington DC: IEEE Press, 2003: 201-212.

[25] HONG Fan, ZHU Xian, WANG Shao-bin. Delegation depth control in trust-management system[C] //Proc of the 19th International Conference on Advanced Information Networking and Applications. Washington DC: IEEE Computer Society, 2005: 411-414.

[26] FREUDENTHAL E, PESIN T, PORT L, *et al.* dRBAC: distributed role-based access control for dynamic coalition environments, TR2001-819[R] . New York: New York University, 2001.

[27] 廖俊国, 洪帆, 朱更明, 等. 基于信任度的授权委托模型[J] . 计算机学报, 2006, 29 (8) : 1265-1270.