

面向信息可视化的语义 Focus+Context 人机交互技术

任 磊¹⁾ 魏永长¹⁾ 杜 一²⁾ 张小龙³⁾ 戴国忠⁴⁾

¹⁾(北京航空航天大学自动化科学与电气工程学院 北京 100191)

²⁾(中国科学院计算机网络信息中心科学数据中心 北京 100190)

³⁾(美国宾夕法尼亚州立大学信息科学技术学院 美国宾夕法尼亚州立大学城 16802)

⁴⁾(中国科学院软件研究所人机交互北京市重点实验室 北京 100190)

摘 要 大数据成为继云计算和物联网之后,国际学术界和产业界所共同瞩目的又一个研究热点.信息可视化是辅助用户洞悉大数据背后隐藏的知识和规律的重要方法和有力工具.如何在图形用户界面中对大规模信息以符合认知规律的方式进行可视化,并且使得计算机能够智能化的理解用户意图以配合其进行高效的人机交互,是信息可视化面临的挑战之一.文中提出一种面向信息可视化的语义 Focus+Context 人机交互技术.首先,在基于空间距离的经典 Focus+Context 数学模型基础上对其进行语义建模和扩展,建立了面向信息空间和可视化表征空间的语义距离模型以及语义关注度模型,定义了交互中的焦点对象与语义上下文.其次,在此基础上建立了语义 Focus+Context 用户界面模型,给出了界面抽象元素和实体元素以及映射关系的形式化描述,同时建立了 Focus+Context 交互循环机制.最后,给出了应用于经典 Focus+Context 及鱼眼数学模型描述,表明文中提出方法具有很好的兼容性描述能力;同时,给出了面向文件系统主题聚集的语义 Focus+Context 应用,给出了基于主题语义关注度与嵌套圆鱼眼视图的动态可视化实例,应用实例表明文中提出技术能够有效支持用户在信息可视化界面中对大规模信息进行智能化的可视化和交互探索.

关键词 信息可视化;人机交互;用户界面;焦点+上下文;大数据;可视分析

中图法分类号 TP301

DOI号 10.11897/SP.J.1016.2015.02488

Human-Computer Interaction Based on Semantic Focus+Context for Information Visualization

REN Lei¹⁾ WEI Yong-Chang¹⁾ DU Yi²⁾ ZHANG Xiao-Long³⁾ DAI Guo-Zhong⁴⁾

¹⁾(School of Automation Science and Electrical Engineering, Beihang University, Beijing 100191)

²⁾(Scientific Data Center, Computer Network Information Center, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190)

³⁾(School of Information Sciences and Technology, Pennsylvania State University, PA 16802, USA)

⁴⁾(Beijing Key Laboratory of Human-Computer Interaction, Institute of Software, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190)

Abstract Big data has become another revolutionary technology following the booming of cloud computing and internet of things. Information visualization is regarded as an essential approach and powerful tool for users to get insight from big data. However, great challenges still exist in information visualization and smart interaction in small interfaces according to cognitive law. This paper proposes a semantic Focus+Context interaction technology for information visualization in user interface. Firstly, a semantic distance model and a semantic Degree-Of-Interest (DOI) model towards information space and visual representation space are presented. And based on the models, semantic context related to a focus is defined. Secondly, the paper proposes a semantic Focus+

收稿日期:2014-07-26;最终修改稿收到日期:2015-06-25. 本课题得到国家自然科学基金(61103096,61402435)、国家“八六三”高技术研究发展计划项目基金(SS2015AA042100)资助. 任 磊,男,1979年生,博士,副教授,中国计算机学会(CCF)会员,主要研究方向为信息可视化与人机交互、云计算与云制造. E-mail: renlei@buaa.edu.cn. 魏永长,男,1991年生,硕士研究生,主要研究方向为信息可视化. 杜 一,男,1988年生,博士,助理研究员,主要研究方向为信息可视化与人机交互. 张小龙,男,1969年生,博士,副教授,主要研究方向为知识可视化与人机交互. 戴国忠,男,1944年生,研究员,博士生导师,中国计算机学会(CCF)高级会员,主要研究领域为人机交互.

Context based user interface model, defining both abstract and entity elements as well as the mappings in this kind of user interface. Finally, the proposed technology is applied to semantic theme clustering for exploration of large scale file systems. Application examples show that the proposed technology can effectively support large scale information visualization in small interface and intelligent interaction for semantic exploration of complex data.

Keywords information visualization; human-computer interaction; user interface; Focus + Context; big data; visual analytics

1 引言

随着互联网、物联网、云计算的迅猛发展,人们进入了信息爆炸的时代.人们在信息的海洋里常常面临“认知过载”和“视而不见”的双重困境^[1].尤其是近年来伴随着大数据^[2-5]的兴起,巨量的数据规模、多样的数据种类、高速动态的数据变化率以及低密度特征的高价值性,给人们理解现象、探索知识、挖掘规律、辅助决策带来了巨大的挑战.

目前我们已经步入大数据时代,自国际著名期刊《Science》和《Nature》出版了专门针对大数据的专辑之后^[2-3],大数据成为继云计算和物联网之后的又一个研究热点,并且引起了国际学术界、产业界以及政府的广泛关注.如何从大规模复杂数据中抽取有价值的信息,洞悉数据背后隐藏的知识 and 规律是大数据研究领域的核心问题.围绕着这一目标,学术界主要从两个维度展开研究:一方面是从计算机的角度出发,充分利用计算机的大容量存储和高效能计算能力,通过自动化高效率的数据处理和分析算法来挖掘知识;二是从人(用户)的角度出发,旨在充分利用人的感知和认知能力优势,例如人类视觉系统对图像信息的瞬间接收和理解能力,主要通过人机交互的方式协作分析问题并挖掘数据背后隐藏的知识、以获得洞见(insight).大数据可视化^[6]即是第二个研究维度的典型代表.它建立在信息可视化(information visualization)理论^[7-8]的基础上,通过建立数据空间到图形空间之间的映射关系,以符合人们心理映像的可视化图形隐喻作为数据的信息表征,使得人们能够直观的感知和认知数据背后的规律和知识.目前,信息可视化已经成为大数据研究的重要方法和有力工具.

人机交互技术是信息可视化不可分割的重要组成部分^[9].《极端超大规模数据可视化面临的十大挑战》^[10]一文中指出,对于“认知和人机交互”的探究是大数据时代信息可视化研究领域的核心问题.对数据进行探索而获取知识以及洞见的过程,即是人

机之间进行交互、共同协作发现问题、分析问题和解决问题的过程.其中的一个关键问题是如何使得计算机在交互中成为理解用户需求的智能主体,对海量的可视化表征按需进行取舍以协调在用户界面中显示大规模信息的矛盾,并且以更符合分析活动认知规律的方式在用户界面中进行可视化呈现,智能化地配合用户进行高效地数据探索与知识发现.

信息可视化领域的 Focus+Context (F+C)^[11-12]技术是一种符合认知心理学的人机交互技术,能够有效匹配人在探索信息时的认知心理映像,在信息可视化各研究领域得到了广泛的应用.F+C 交互技术依据的认知规律是:人在探索所关注的焦点信息和详细细节信息时,往往需要同时保持整个信息空间尤其是焦点相关的上下文信息的可见性.F+C 的一个典型的应用是鱼眼视图技术^[11],通过局部图形变形技术,将用户关注的可视化表征突出并放大,焦点周围的图形随着距离渐远而逐渐缩小.当前 F+C 交互技术的局限性是基于可视化表征之间的空间距离来定义焦点和上下文的关系,忽略了用户高层意图所关注的、与焦点具有语义关联关系的上下文信息;同时,当数据规模增大时,数据与图形之间的映射将导致大规模可视化表征空间,在交互中若不对所需可视化的上下文进行有效取舍,将严重影响交互的效率.

本文在 F+C 的基本理论和技术基础上对其进行扩展,提出一种面向信息可视化的语义 F+C 人机交互技术.通过建立可视化表征空间的语义距离模型和语义关注度(Degree-Of-Interest, DOI)模型,对交互中可视化表征的焦点和语义上下文进行定义,并在此基础上建立了基于语义 F+C 的用户界面模型.最后将其应用于经典 F+C 及鱼眼数学模型的描述,并给出了面向文件系统主题聚集的语义 F+C 应用.

2 相关工作

2.1 信息可视化与 F+C 交互

信息可视化与科学计算可视化关注的重点不

同,信息可视化以数据中的抽象信息作为可视化的主要对象,通过建立符合认知心理映像的、可交互的可视化表征,辅助人们对复杂数据中隐藏的规律和知识进行探索.当用户在呈现大规模数据的可视化界面中进行探索时,其认知心理倾向于在对局部感兴趣的详细信息进行探索的同时,保持信息空间的全局视图随时可见^[13].依据这一认知规律所发展出的交互技术主要包括 Overview+Detail 和 Focus+Context 两类.Overview+Detail 技术将信息空间划分为两个视图,分别提供用于信息空间全局导航的整体视图以及局部的详细信息视图.目前已经广泛应用于信息可视化各研究领域.然而,Overview+Detail 的主要问题是用户的关注点需要在两个视图之间不断切换,这往往导致信息分析过程中连续性注意力的中断、工作记忆的频繁转换,造成思考时间的延长^[7].

F+C 技术将信息空间分为用户所关注的焦点信息对象以及上下文信息对象集合,并假定两类信息对象在可视化时所展示的信息是有区别的,并且要求焦点和上下文两种类型的信息对象融合于同一个单独的视图中予以可视化呈现.

2.2 鱼眼视图与变形技术

Furnas^[11]奠定了 F+C 技术的理论基础并定义了数学模型,通过建立关注度 DOI 函数,按照关注度大小对信息对象进行可视化映射或者变形处理.鱼眼视图是 F+C 技术的典型代表,将可视化界面

中用户关注的焦点区域在原位置进行变形和放大,以呈现更丰富和详细的信息,同时保证焦点周围区域的空间上下文信息可视化的连续性. Sarkar 等人^[14]将鱼眼视图应用于网络节点的交互探索中,如图 1(a)所示,焦点节点被放大显示,周围与之相连的节点按照距离逐渐缩小. Tu 等人^[15]将鱼眼视图与 Treemaps 层次结构信息可视化技术进行结合,如图 1(b)所示,用户可以在大规模层次信息的 Treemaps 图中选择感兴趣的分支并放大显示,其余的 Treemaps 矩形空间则被压缩. Carpendale 等人^[16]分析了鱼眼变形函数的三种变换模式:半球、高斯、线性,并用于密集型地图界面的导航,如图 1(c)所示,可以在小界面地图中选定焦点区域进行放大,同时保持着焦点的空间上下文. Kincaid^[17]将鱼眼视图用于频繁变化的时序信息可视化界面中,能够在密集的时序信息中对局部变化曲线做拉伸变形可视化展示,同时保持前后时序上下文信息的连续性,如图 1(d)所示. 任磊等人^[18-19]提出了基于嵌套圆的鱼眼视图并应用于文件系统,并且针对时序鱼眼视图进行改进,将时间轴单焦点交互扩展为时间轴多焦点交互,能够通过笔交互圈选感兴趣的时间轴焦点区域,对多个焦点进行拉伸变形,如图 1(e)所示是面向金融数据可视化的时间轴多焦点鱼眼视图^[20].此外,鱼眼视图还应用于较长的菜单列表的可视化^[21]、搜索引擎搜索结果列表的可视化^[22]以及 PDA 手持设备日历的

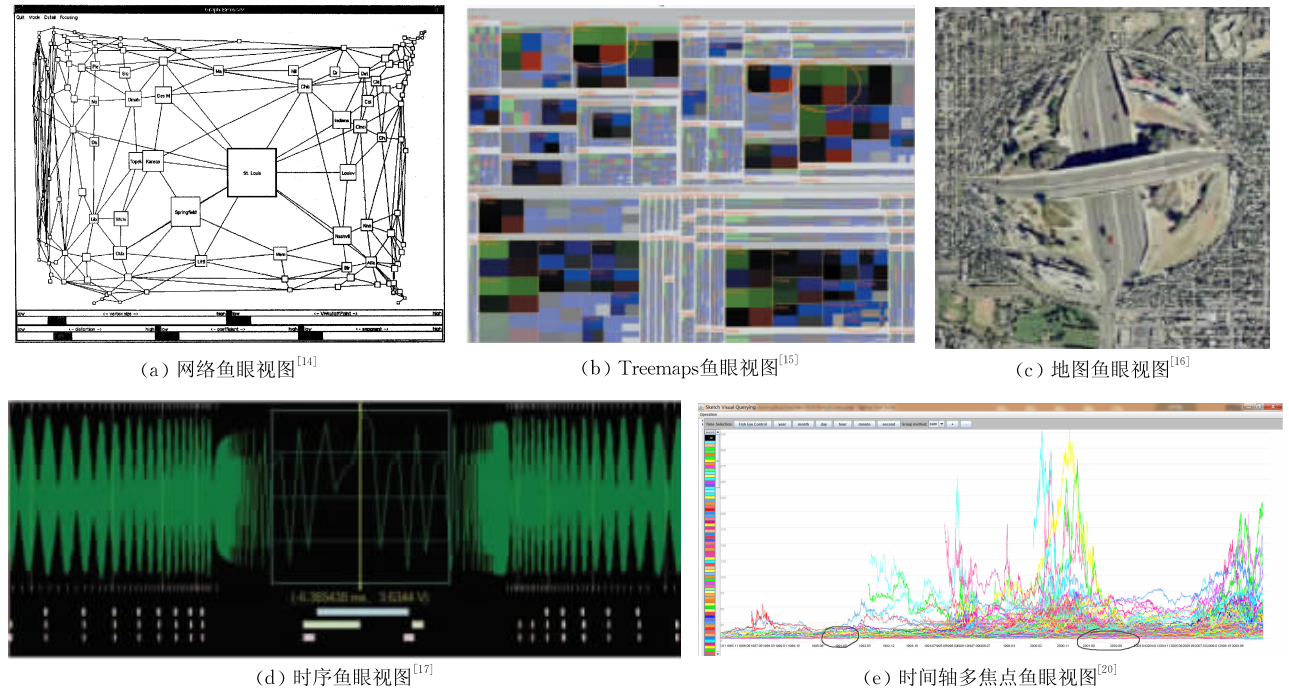


图 1 鱼眼视图技术应用举例

可视化^[23]等。鱼眼视图的优势是能够在较小的界面中对大规模信息的整体视图进行可视化呈现，同时又能通过变形技术对焦点区域进行放大以展示丰富的详细信息。

2.3 基于关注度的动态 F+C 技术

除了鱼眼视图技术，研究者围绕着用户的关注度模型提出了大量基于非变形技术的 F+C 技术。Lamping 等人^[24]提出了针对大规模层次结构信息可视化的双曲几何变换技术(Hyperbolic Geometry)，在交互中根据焦点节点的选择，对树节点进行重新布局和可视化。Yee 等人^[25]提出了针对网络可视化的放射图技术(Radial Graph)，如图 2(a)所示，在交

互中将用户关注的焦点节点显示在界面中央位置，将与焦点相关联的网络节点从内向外动态重新布局在一系列同心圆环上。Heer 等人^[26]提出了面向层次结构信息可视化的关注度树技术(DOI Tree)，如图 2(b)所示，在交互中将用户感兴趣的焦点节点作为树根节点布局在界面的一侧，焦点节点的子树分支一层一层地动态向界面另一侧展开。Ren 等人^[27-28]提出了面向网络信息可视化的关注度放射图技术(DOI-Wave)，如图 2(c)所示，将网络节点以选中的焦点节点为树根节点，动态地重新生成向一侧展开的扇形放射状树。上述非变形 F+C 技术主要以交互中的用户关注度为计算依据，将用户关注的焦点对象布局在界面的醒目位置，同时动态地根据焦点对象重新计算上下文对象集合，并动态变换界面中的可视化表征，实时反馈给用户。

近年来，F+C 技术中的焦点和上下文关联方法同时也应用于信息多面体(Multi-facet)的可视化与可视分析中。信息多面体通常是指具有多个信息侧面的信息体，多个信息侧面之间具有内在关联关系，对于信息多面体的可视化需要同时建立多个信息侧面的视图，通过交互式关联和刷新等技术对信息多面体视图进行分析。例如，PivotSlice^[29]是一个对可视分析历史进行关联分析的可视化工具，如图 3(a)所示，当用户在可视分析历史中选择感兴趣的焦点节点时，与此相关的各个信息侧面视图中与焦点节点有关系的可视化图元将动态地链接至焦点节点，以便于用户根据关联关系进行分析。与 PivotSlice 类似的还有 PivotPath^[30]，如图 3(b)所示，该工具将学术文献资源、学术概念以及人物三类节点之间的关系以动态链接进行可视化展示，当用户选择上述 3 个类别中的某个节点时，另外两个类别中与选中节点相关联的信息节点将被动态筛选并进行可视化展示。基于 DOI 动态计算相关节点并进行可视化的方法也应用于网络结构信息的动态可视化中，如图 3(c)所示是一种基于 DOI 的动态网络可视化技术^[31]，能够根据用户选择的学术文献作者，动态地计算具有引用关系的作者节点，并以用户所选作者作为焦点节点，重新对作者间的引用关系网络进行动态重构可视化。

综上分析可见，F+C 技术为解决大规模信息如何在用户界面中进行可视化呈现提供了一种有效的方法，并且是一种以用户为中心的、用户视角驱动的可视化探索与分析技术。F+C 技术将用户关注焦点与上下文始终关联的思想，对于大数据时代探究数

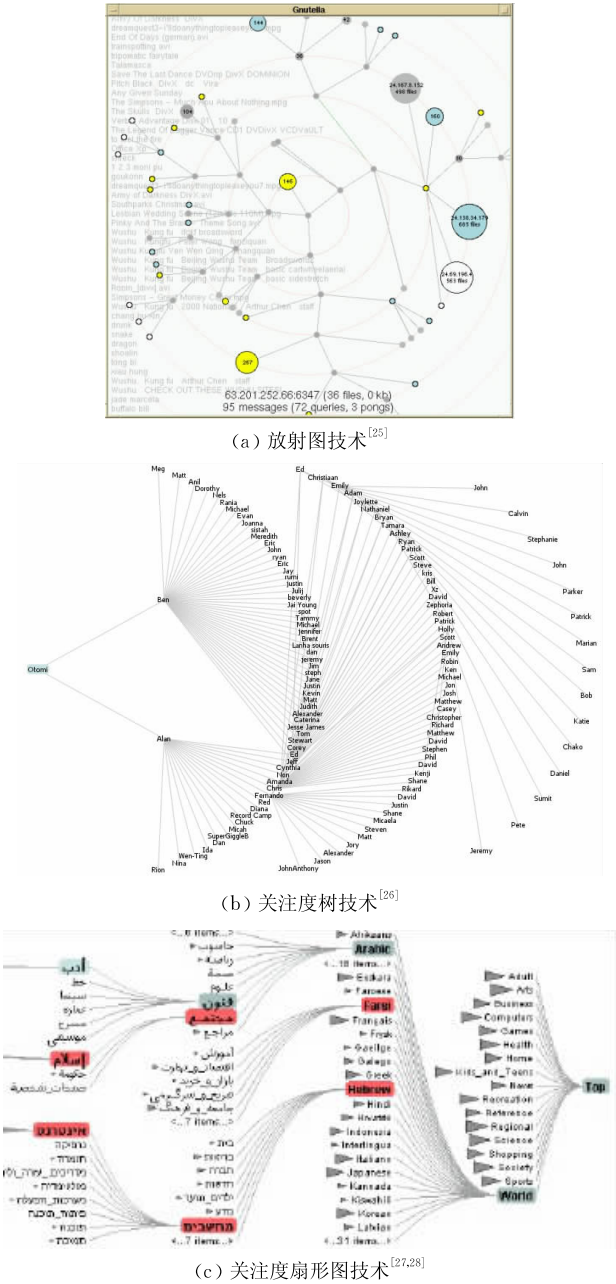


图 2 基于 DOI 的 F+C 技术举例

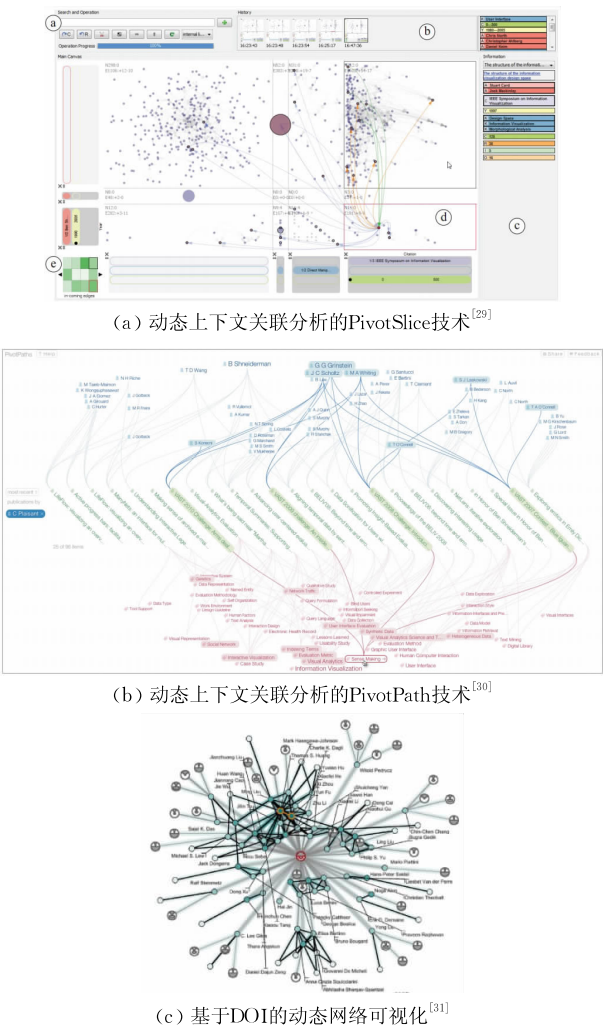


图 3 动态上下文关联可视化

据背后隐藏的规律和知识具有重要意义.然而,当前F+C技术主要基于用户界面中可视化表征的空间距离来决定焦点和上下文的关系,难以全面地体现复杂信息背后蕴含的各种语义关系.同时,当面临大规模数据时,需要根据用户的关注度模型对可视化信息空间进行取舍,以充分利用用户界面有限的显示空间,将用户最为关注的焦点信息以及具有语义关联的上下文信息动态反馈给用户,支持用户智能化的交互式可视化探索与分析.

3 语义 DOI 模型

3.1 语义距离定义

在信息可视化界面中,将语义距离较近的信息对象突出并主动呈现给用户,将有助于智能化地辅助用户探索复杂信息.信息对象之间的语义距离不仅取决于它们的可视化表征在界面中的空间距离的

远近.语义距离还与用户探索信息的任务目标以及意图密切相关.例如,当用户对互联网舆情信息进行分析时,如果分析任务是为了舆情传播的路径,那么具有相互引用链接关系的舆情节点之间就具有更近的语义距离,是用户关注的重点;但如果用户意图是分析热门主题的聚集性和影响力,那么具有相似主题内容的舆情节点之间则在语义上距离更近,对于用户的任务目标更具有意义,而这些节点之间也许并没有互相引用和链接的关系.因此,信息对象之间是否具有语义关系以及语义距离的远近,随用户任务需求的不同而变化.

同时,信息空间本身具有的抽象特征也是影响语义距离的重要因素.Shneiderman^[32]将抽象信息类型分为七类:一维、二维、三维、多维、层次、网络、时序.这些特定类型的信息对象之间所固有的结构性关系,例如层次结构信息中父子和兄弟节点之间的关系、有向网络节点之间的链接关系、时序信息随时间轴的连续性变化等,都是计算语义距离的重要参数.传统F+C技术中所采用的空间距离仍是计算语义距离的重要因素.

基于上述讨论,在此给出语义距离的形式化定义.

定义 1. 对于用户关注的焦点信息对象 f ,信息空间中任一信息对象 x 与 f 之间的语义距离:

$$SemDis(f,x)=F_1(w_1\cdot Intent(f,x),w_2\cdot InfoFeature(f,x),w_3\cdot Dis(f,x)),$$

其中, $Intent(f,x)$ 表示用户任务目标和操作意图因素,指的是 x 关于 f 的用户意图相关性大小.通常分为显性(explicit)意图和隐性(implicit)意图两类,显性意图指的是明确的可视化分析任务目标,隐性意图指的是根据用户交互操作序列所推断的用户偏好与潜在倾向性目的. $InfoFeature(f,x)$ 表示信息对象的特征因素,例如,根据不同类型信息(层次、网络、时序、多维等)所具有的特征,确定 x 与 f 之间的关联关系. $Dis(f,x)$ 是当前 x 与 f 的可视化表征之间的中心距离.通过赋予权重 w_1 、 w_2 、 w_3 ,语义距离模型可构建为上述 3 种因素的函数 F_1 .

3.2 语义 DOI 定义

语义距离是语义关注度(DOI)模型的重要参数,体现了信息对象 x 与焦点信息对象 f 之间在语义层面的距离大小.在用户与可视化界面进行交互的过程中,可视化表征代表的信息对象具有不同的先验重要度.例如,根据视觉系统认知心理学,界面

中央位置是获得用户关注最多的区域；此外，用户在可视化分析过程中会对认为重要的可视化表征进行标记，相当于将先验重要度赋予了相应的信息对象。因此，先验重要度也是影响用户关注度模型的重要因素。

为了更加灵活地控制和调整交互过程中语义上下文信息的规模，可通过设置阈值的方式对语义关注度模型所得出的信息对象集合予以限制。

如图 4 所示是语义 DOI 模型的组成元素及关系，以下给出语义 DOI 模型形式化定义。

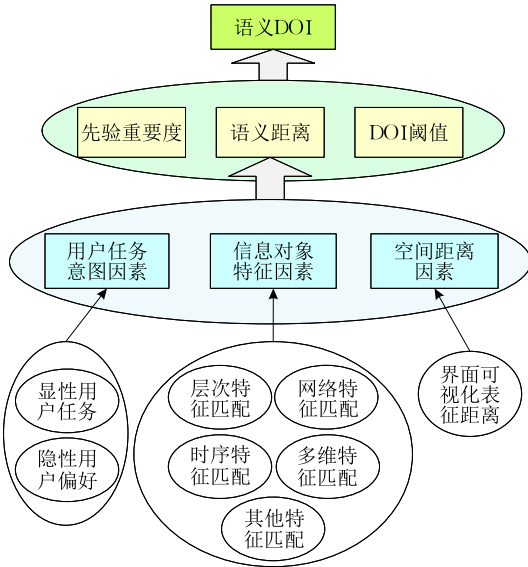


图 4 语义 DOI 模型

定义 2. 在用户选定了焦点信息对象 f 的前提下，信息对象 x 相对于 f 的语义关注度：

$$SemDOI(x|f) = F_2(API(x), SemDis(f, x)), \\ SemDOI(x|f) > c,$$

其中， $API(x)$ 是信息对象 x 的先验重要度， $SemDis(f, x)$ 是信息对象 x 与 f 之间的语义距离， c 是 DOI 阈值。语义关注度是关于先验重要度、语义距离和阈值的函数 F_2 。

在语义 DOI 定义的基础上，给出语义上下文的定义如下。

定义 3. 语义上下文 $SemContext(f)$ 是信息对象 x 的集合，其中 $SemDOI(x|f) > c$ 。

4 语义 F+C 用户界面模型

基于上述语义 DOI 模型，结合信息可视化的智能用户界面模型理论^[28,33-35]，我们建立了语义 F+C 用户界面模型（简称 SFC-UI），如图 5 所示。

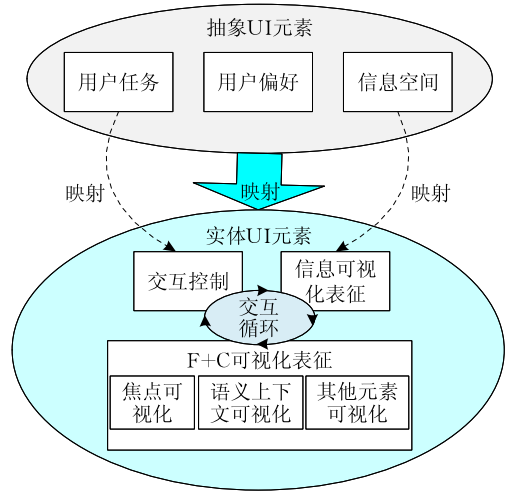


图 5 语义 F+C 用户界面模型 SFC-UI

SFC-UI 的模型元素主要包括用户任务、用户偏好、信息空间、交互控制、信息可视化表征。其中，用户任务、用户偏好、信息空间属于抽象 UI 元素范畴，这些元素都是借助界面中的各种隐喻来间接地进行表达。交互控制和信息可视化表征属于实体 UI 元素范畴，是实际出现在图形界面中的具体元素。SFC-UI 模型的问题描述可以看做从抽象 UI 元素到实体 UI 元素之间的映射问题。对于元素间映射的描述也体现了 SFC-UI 模型的内在联系。

以下给出抽象 UI 元素的形式化定义。

定义 4. 用户任务 $UserTask = \langle DomainObjective, SubTaskSet, ProcessLogic \rangle$ 。其中， $DomainObjective$ 是领域相关的问题目标， $SubTaskSet$ 是子任务集合， $ProcessLogic$ 是子任务流程逻辑定义。

定义 5. 用户偏好 $UserPreference = \langle PreferItem, PreferContent \rangle$ 。其中， $PreferItem$ 是用户偏好项目标识， $PreferContent$ 是用户偏好项目内容。用户偏好可以显式的定义各个特征项，也可以通过用户交互行为历史进行分析提取。

定义 6. 信息空间 $InfoSpace = \langle StructuredDataSet, UnstructuredDataSet, DataSource \rangle$ 。其中， $StructuredDataSet$ 是结构化数据集合， $UnstructuredDataSet$ 是非结构化数据集合， $DataSource$ 是数据源描述。

以下给出实体 UI 元素的形式化定义。

定义 7. 可视化表征 $VisualRepresentation = \langle SpatialSubstrate, VisualMetaphor, GraphicMarkAttributes \rangle$ 。其中， $SpatialSubstrate$ 是空间基， $VisualMetaphor$ 是可视化图形隐喻， $GraphicMarkAttributes$ 是视觉元素属性。

定义 8. 交互控制 $InteractionControl = \langle InteractEvent, InteractObject, InteractAction \rangle$. 其中, $InteractEvent$ 是交互事件, $InteractObject$ 是交互对象, $InteractAction$ 是交互动作.

以下给出抽象 UI 元素与实体 UI 元素之间的映射定义.

定义 9. $UserTask$ 与 $InteractionControl$ 之间的映射 $T-C-Mapping = \langle SubTask, InteractionControlProcess \rangle$. 其中, 将子任务 $SubTask$ 映射为一系列可选的交互控制集合, $InteractionControlProcess$ 定义了交互控制集合以及交互流程.

定义 10. $InfoSpace$ 与 $VisualRepresentation$ 之间的映射 $I-V-Mapping = \langle SpatialSubstrateMapping, VisualMetaphorEncoding, LayoutAlgorithm \rangle$. 其中, $SpatialSubstrateMapping$ 是空间基映射, $VisualMetaphorEncoding$ 是可视化图形隐喻的视觉编码, $LayoutAlgorithm$ 是可视化布局算法.

在以上定义的基础上, 引入 F+C 交互循环: 交互控制(输入)→信息可视化表征→F+C 可视化表征→交互控制(输出), 其中包括以下 3 种映射关系.

定义 11. 交互控制(输入)与信息可视化表征之间的映射 $C-V-Mapping = \langle InteractObject, VisualMetaphor \rangle$. 将交互控制中的交互对象与可视化隐喻建立联系.

定义 12. 信息可视化表征与 F+C 可视化表征之间的映射 $V-FC-Mapping = \langle FocusRepresentation, SemContextRepresentation, Others \rangle$. 该映射描述的是界面中的信息可视化表征通过交互动作, 映射为三类区别对待的可视化表征: $FocusRepresentation$ 是焦点可视化表征, $SemContextRepresentation$ 是语义上下文可视化表征, $Others$ 是除了焦点和上下文之外的可视化表征集合.

定义 13. F+C 可视化表征与交互控制(输出)之间的映射 $FC-C-Mapping = \langle FocusRepresentationMapping, SemContextRepresentationMapping, LayoutAlgorithm, VisualizationScale \rangle$. 该映射描述的对焦点和上下文的可视化表征进行特别的可视化处理, 并输出反馈给用户. $FocusRepresentationMapping$ 是对于焦点可视化表征的处理方法, $SemContextRepresentationMapping$ 是对于语义上下文可视化表征的处理方法, $LayoutAlgorithm$ 是可视化布局算法, 例如基于不同数学变换的鱼眼变形算法等, $VisualizationScale$ 是界面可视化的尺度级别.

5 应 用

5.1 应用于经典 F+C 及鱼眼数学模型

当语义关注度是关于语义距离的单调减函数, 其中的一个应用特例是:

$SemDOI(x|f) = API(x) - SemDis(f, x)$;
并且 $Intent(f, x)$ 和 $InfoFeature(f, x)$ 均为 0, 即当 $SemDis(f, x) = Dis(f, x)$ 时, $SemDOI(x|f)$ 即表示经典的 F+C 数学模型.

在此基础上, 当定义可视化表征的变形函数如下:

$$RenderedSize(x) = TrueSize(x) \times Mag(SemDis(f, x));$$

其中, $TrueSize(x)$ 指的是信息对象 x 的可视化表征原来的大小, 变形因子函数 Mag 是关于 $SemDis(f, x)$ 的单调减函数, 由于 $SemDis(f, x) = Dis(f, x)$, 因此变形因子函数仅是关于空间距离的变形映射, $RenderedSize(x)$ 表示根据变形计算得到的可视化表征变形后的大小. 则该定义即代表了基于空间距离的鱼眼数学模型.

可见, 语义距离和语义 DOI 模型可以十分方便地应用于经典 F+C 及鱼眼数学模型, 对于经典模型的形式化描述提供了很好的兼容性支持.

5.2 面向文件系统主题聚集的语义 F+C 应用

随着计算机存储容量的增大, 个人计算机中积累的各种工作、生活文件的规模呈现爆炸性增长. 如图 6 是采用嵌套圆可视化技术对某用户文件系统中“当前工作”文件夹进行可视化的界面, 圆与圆之间的嵌套关系代表树结构中的父子关系, 树结构中同层次的兄弟节点以相切的圆表示, 作为叶子节点的文件以不同的颜色和大小对文件的属性进行可视映射. 该文件夹大约包含 10 万个文件, 由图中可视化效果可见, 由于文件规模较大, 很多圆的尺寸缩小到了像素点大小, 难以直观地探索文件.

日常工作中, 研究者经常进行的一项任务是根据某特定主题撰写研究报告, 开展此类工作时往往需要动态搜集个人积累的文件库中与报告相关的文档, 在与文件系统的交互过程中形成一个专门用于该主题的支撑文件库, 随时作为参考文献并提供报告素材. 例如, 要撰写关于大数据可视化交互技术的报告, 为此专门建立一个“大数据可视化交互技术”文件夹, 但是与其相关的文件分布在“当前工作”目录下的各个文件夹中, 通常的做法是根据记忆和经

验将感兴趣的文件夹或文件拷贝至新建主题的目录下,但往往造成同一文件夹或文件在多个主题目录下重复冗余出现,并且仅靠用户记忆汇集相关文件效率往往较低.另一种做法是通过文件系统的搜索引擎,根据关键词自动搜索相关文件,但由于面向主题的文件搜集和报告撰写是一个持续一段时间的交互过程,在此过程中用户会不断搜集到与搜索关键词毫无关系却对主题具有价值的文档,即存在潜在语义关联的文档,而此类文件是仅通过搜索引擎难以获取的.针对以上问题,本文采用信息可视化与语义 F+C 交互相结合的方法予以解决.

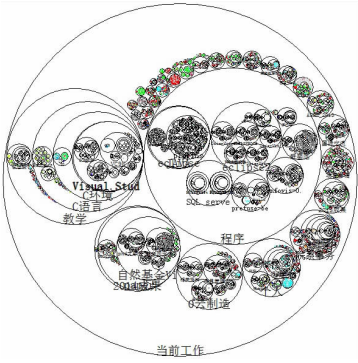


图 6 “当前工作”文件夹的嵌套圆可视化视图

面向文件系统主题聚集的语义 F+C 应用的基本思想是:在用户与文件系统进行交互的同时,通过基于语义 DOI 的嵌套圆鱼眼视图,对主题以及语义相关的文件夹和文件进行动态可视化展示.

显性的用户任务意图通过 F+C 界面模型中的 *UserTask* 建立,主题经过切词处理分解为“大数据”、“可视化”及“交互”等基本主题要素,作为显性的子任务.在用户与文件系统交互过程中,将用户交互历史具有较高关注度的文件夹或文件,例如与主题报告同时浏览的频度较高或对于文件名进行了标注等,此类作为隐性的用户任务意图,通过 *UserPreference* 建立偏好模型.因此,将 $Intent(f, x)$ 定义为: $Intent(f, x) = ExplicitSubTask(f, ThemeElements, x) + ImplicitPreference(SimuOpen(f, x), Mark(x))$. 其中, $ExplicitSubTask(f, ThemeElements, x)$ 表示对于主题焦点对象基本关键词要素与树节点 x 进行匹配,若匹配则取值为 1,否则为 0. $SimuOpen(f, x)$ 表示交互中主题焦点对象与树节点 x 同时打开的频度所体现的关注度, $SimuOpen(f, x) = SimuOpenTimes(f, x) - 1$,其中 $SimuOpenTimes(f, x)$ 为交互中 x 与主题焦点对象同时打开的总次数,减去 1 表示去掉用户的第一次随机浏览,以表示用户回访

同一 x 时已带有一定关注度. $Mark(x)$ 表示交互中对树节点 x 进行标注所体现的关注度, $Mark(x) = MarkTimes(x) - 1$,其中 $MarkTimes(x)$ 表示在执行任务的交互过程中对 x 进行标注的次数,减去 1 表示去掉第一次作为无参考价值的标注. $InfoFeature(f, x)$ 定义为: $InfoFeature(f, x) = TreeLink(f, x)$. 其中, $TreeLink(f, x)$ 表示主题焦点对象与树节点 x 之间存在的树结构关系,若存在 3 层以内直系父子关系或具有同父节点的同层兄弟关系,则取值为 1;否则为 0. $Dis(f, x)$ 定义为: $Dis(f, x) = CircleDis(f, x)$,表示主题焦点对象与树节点 x 之间的圆心距离远近,取值为二者圆心距离占界面最大圆形直径的百分比.综上可赋予 $Intent(f, x)$ 和 $TreeLink(f, x)$ 较高权重,而 $CircleDis(f, x)$ 权重较小从而使得空间距离的影响变小,在此基础上建立 $SemDis(f, x)$,可定义为三者之和的倒数.进一步,定义 $API(x) = F(ExplicitSubTask(f, ThemeElements, x), UICenterDis(x), Mark(x))$. 其中, $ExplicitSubTask(f, ThemeElements, x)$ 与上述定义一致,表示树节点 x 是否已具备显性主题要素特征, $UICenterDis(x)$ 表示树节点 x 的圆心距离界面中心的距离远近程度,取值为 $(R - CenterDis(x))/R$,其中 R 是界面最大圆的半径, $CenterDis(x)$ 是 x 与最大圆心距离.然后,将 $SemDOI(x|f)$ 定义为 $API(x)/SemDis(f, x)$,与先验重要度成正比,而与语义距离成反比.

如图 7 所示,是用户在与文件系统的语义 F+C 交互中形成的嵌套圆鱼眼可视化界面.该用户界面中,用户所关注的主题焦点对象“大数据可视化交互技术”文件夹所对应的嵌套圆可视化结构,显示在用户视觉注意力最为集中的界面中央位置;同时,将交互中根据语义 DOI 模型动态汇集的语义上下文、即具有语义关联的文件夹的嵌套圆可视化结构,动态可视化布局在焦点的周围,形成鱼眼视图效果.根据 F+C 交互技术的基本理论,上述可视化界面符合用户的认知心理学规律.图 7 中所显示的语义上下文中,名为“认知”的文件夹表面上与用户所关注的主题无关,该文件夹的嵌套圆可视化结构之所以进入主题相关的上下文中,是根据用户在文件系统交互过程中频度较高的关联性访问,通过隐性任务意图计算使得“认知”相关文件夹得到了较高的语义关注度,因此也与主题焦点圆相切,以表征其紧密的语义关联关系.由图可见,基于语义 DOI 的 F+C 人机交互技术,能够对用户在交互中所体现的显性和隐性任务意图进行计算,将与用户目标关联性较强的

语义上下文有所取舍的进行可视化、并作为交互反馈动态呈现给用户。同时,与图 6 进行对比可见,如果用户不采用基于语义 DOI 的 F+C 人机交互技术,将在“当前工作”文件夹中大规模的文件集合中进行交互操作,并且在撰写关于“大数据可视化交互技术”的报告这一任务过程中,需要根据撰写进程中关注点的不断变化,频繁的对与关注点相关的文献进行收集、标注、整理、分类等操作,往往对于用户造成较重的交互负担,导致用户将较多的精力放在降低核心任务完成效率的交互操作中. 因此,基于语义 DOI 的 F+C 人机交互技术,既能够在有限的用户界面空间中有效对较大规模数据进行可视化,同时又能减轻用户工作记忆负担,并且通过可视化表征直观的对焦点与语义上下文进行展现,能够辅助增强用户的视觉感知和认知能力,因此能够有效提高用户完成任务的效率.

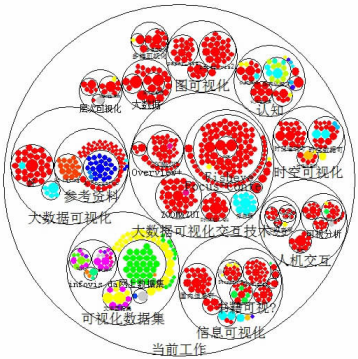


图 7 语义 F+C 交互中的嵌套圆鱼眼动态可视化

6 结 论

如何洞悉大数据背后隐藏的知识和规律是当前的研究热点,信息可视化大数据分析 and 挖掘提供了重要方法和有力工具. 如何在有限的用户界面中对大规模复杂信息以符合认知规律的方式进行可视化,并且使得计算机能够智能化的理解用户意图以配合其进行高效的人机交互,是大数据背景下信息可视化研究的关键问题之一. 本文提出了一种面向信息可视化的语义 Focus+Context 人机交互技术,在基于空间距离的经典 Focus+Context 数学模型基础上对其进行语义建模和扩展,建立了面向信息空间和可视化表征空间的语义距离模型以及语义关注度模型,定义了交互中的焦点对象与语义上下文. 在此基础上,建立了语义 Focus+Context 用户界面模型,给出了界面抽象元素和实体元素以及映射关

系的形式化描述,同时建立了 Focus+Context 交互循环机制. 最后,应用于经典 Focus+Context 及鱼眼数学模型描述,表明本文提出方法具有很好的兼容性描述能力;同时,给出了面向文件系统主题聚集的语义 Focus+Context 应用,给出了基于主题语义关注度与嵌套圆鱼眼视图的动态可视化实例,应用实例表明本文提出技术能够有效支持用户在较小界面中对大规模信息进行智能化的可视化和交互探索. 需要指出的是,本文应用实例仍有待深入结合全文文本分析研究领域的相关成果,以更全面的挖掘出文件之间的内在语义关系,这也是我们下一步的工作之一.

本文提出的语义 Focus+Context 模型,其价值和意义在于为信息可视化中的人机交互技术研究提供了一种新的符合认知规律的、更为智能化的理论模型,对于大数据背景下如何有效的对大规模复杂数据进行分析提供了一种用户关注度驱动的智能人机交互式可视分析方法. 同时,本文提出的语义 Focus+Context 模型是一个开放的理论框架,例如,该模型在语义分析方面具有广泛的包容性,语义距离、语义 DOI、语义上下文等模型元素根据应用领域具体问题的不同,可以定义和接入不同深度的语义分析算法,例如上述文件系统应用实例可以进一步接入更为全面的文本语义分析算法. 因此,本文的语义 Focus+Context 模型可作为基础性理论框架,能够面向多个具体领域问题的特征对语义 DOI 建模,建立领域问题相关的语义 Focus+Context 用户界面模型. 下一步研究工作将密切结合文本、网络、多维、时空等大数据背景下常见应用中的具体可视分析问题,融合相关的语义分析算法,将语义 F+C 交互技术应用于更广泛问题域的可视分析与挖掘.

参 考 文 献

[1] Ren Lei. Research on Interaction Techniques in Information Visualization [Ph. D. dissertation]. Institute of Software, Chinese Academy of Sciences, Beijing, 2009(in Chinese) (任磊. 信息可视化中的交互技术研究[博士学位论文]. 中国科学院软件研究所, 北京, 2009)

[2] Doctorow C. Big data: Welcome to the petacenter. Nature, 2008, 455(7209): 16-21

[3] Reichman O J, Jones M B, Schildhauer M P. Challenges and opportunities of open data in ecology. Science, 2011, 331(6018): 703-705

[4] Wang Shan, Wang Hui-Ju, Qin Xiong-Pai, Zhou Xuan. Architecting big data: Challenges, studies and forecasts.

- Chinese Journal of Computers, 2011, 34(10): 1741-1752(in Chinese)
- (王珊, 王会举, 覃雄派, 周焯. 架构大数据: 挑战、现状与展望. 计算机学报, 2011, 34(10): 1741-1752)
- [5] Qin Xiong-Pai, Wang Hui-Ju, Du Xiao-Yong, Wang Shan. Big data analysis: Competition and symbiosis of RDBMS and MapReduce. *Journal of Software*, 2012, 23(1): 32-45 (in Chinese)
 - (覃雄派, 王会举, 杜小勇, 王珊. 大数据分析——RDBMS 与 MapReduce 的竞争与共生. 软件学报, 2012, 23(1): 32-45)
 - [6] Keim D, Qu D, Ma K L. Big-data visualization. *IEEE Computer Graphics and Applications*, 2013, 33(4): 20-21
 - [7] Card S K, Mackinlay J D, Shneiderman B. *Readings in Information Visualization: Using Vision to Think*. San Francisco: Morgan-Kaufmann, 1999
 - [8] Keim D. Information visualization and visual data mining. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 2002, 8(1): 1-8
 - [9] Ren Lei, Du Yi, Ma Shuai, Zhang Xiao-Long, Dai Guo-Zhong. Visual analytics towards big data. *Journal of Software*, 2014, 25(9): 1909-1936(in Chinese)
 - (任磊, 杜一, 马帅, 张小龙, 戴国忠. 大数据可视分析综述. 软件学报, 2014, 25(9): 1909-1936)
 - [10] Wong P W, Johnson C R, Chen C, Ross R B. The Top 10 challenges in extreme-scale visual analytics. *IEEE Computer Graphics and Applications*, 2012, 32(4): 63-67
 - [11] Furnas G W. A fisheye follow-up: Further reflections on Focus+Context//*Proceedings of the ACM SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*. Montreal, Canada, 2006: 999-1008
 - [12] Hornbæk K, Bederson B B, Plaisant C. Navigation patterns and usability of zoomable user interfaces with and without an overview. *ACM Transactions on Computer-Human Interaction*, 2002, 9(4): 362-389
 - [13] Larkin J H, Simon H A. Why a diagram is (sometimes) worth ten thousand words. *Cognitive Science*, 1987, 11(1): 65-99
 - [14] Sarkar M, Brown M H. Graphical fisheye views of graphs//*Proceedings of the ACM SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*. Monterey, USA, 1992: 83-91
 - [15] Tu Y, Shen H W. Balloon focus: A seamless multi-Focus+Context method for treemaps. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 2008, 14(6): 1157-1164
 - [16] Carpendale S, Light J, Pattison E. Achieving higher magnification in context//*Proceedings of the ACM Symposium on User Interface Software and Technology*. New York, USA, 2004: 71-80
 - [17] Kincaid R. SignalLens: Focus+Context applied to electronic time series. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 2010, 16(6): 900-907
 - [18] Ren Lei, Wang Wei-Xin, Teng Dong-Xing, et al. Fisheye view for visualizaition of large tree by packing nested circles. *Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics*, 2008, 20(3): 298-303(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. 计算机辅助设计与图形学学报, 2008, 20(3): 298-303)
 - [19] Ren Lei, Wang Wei-Xin, Teng Dong-Xing, et al. A Focus+Context technique for interactive visualization of large hierarchies. *Journal of Software*, 2008, 19(11): 3073-3082 (in Chinese)
 - (任磊, 王威信, 滕东兴等. 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)
 - [20] Ren L, Du Y. A Sketch+Fisheye interface for visual analytics of large time-series//*Proceedings of the 2014 IEEE Conference on Visual Analytics Science and Technology (VAST 2014)*. Paris, France, 2014: 265-266
 - [21] Bederson B B. Fisheye menus//*Proceedings of the ACM Symposium on User Interface Software and Technology*. San Diego, USA, 2000: 217-226
 - [22] Paek T, Dumais S, Logan R. WaveLens: A new view onto internet search results//*Proceedings of the ACM SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*. Vienna, Austria, 2004: 727-734
 - [23] Bederson B B, Clamage A, Czerwinski M P, Robertson G G. DateLens: A fisheye calendar interface for PDAs. *ACM Transactions on Computer-Human Interaction*, 2004, 11(1): 90-119
 - [24] Lamping J, Rao R, Pirolli P. A Focus+Context technique based on hyperbolic geometry for visualizing large hierarchies //*Proceedings of the ACM SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*. Denver, USA, 1995: 401-408
 - [25] Yee K P, Fisher D, Dhamija R, Hearst M S. Animated exploration of dynamic graphs with radial layout//*Proceedings of the IEEE Symposium on Information Visualization*. San Diego, USA, 2001: 43-50
 - [26] Heer J, Card S K. DOITrees revisited: Scalable, space-constrained visualization of hierarchical data//*Proceedings of the Working Conference on Advanced Visual Interfaces*. New York, USA, 2004: 421-424
 - [27] Ren L, Zhang L, Teng D, et al. DOI-Wave: A Focus+Context interaction technique for networks based on attention-reactive interface//Huang M L, Nguyen Q V, Zhang K eds. *Visual Information Communication*. New York: Springer-Verlag, 2009: 85-94
 - [28] Ren L, Tian F, Zhang X, Zhang L. DaisyViz: A model-based user interface toolkit for interactive information visualization systems. *Journal of Visual Languages and Computing*, 2010, 21(4): 209-229
 - [29] Zhao J, Collins C, Chevalier F, Balakrishnan R. Interactive exploration of implicit and explicit relations in facet datasets. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 2013, 19(12): 2080-2089
 - [30] Dörk M, Riche N H, Ramos G, Dumais S T. Pivotpaths: Strolling through faceted information spaces. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 2012, 18(12): 2709-2718

[31] Abello J, Hadlak S, Schumann H, Schulz H J. A modular degree-of-interest specification for the visual analysis of large dynamic networks. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 2014, 20(3): 337-350

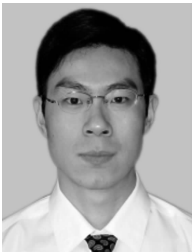
[32] Shneiderman B. The eyes have it: A task by data type taxonomy for information visualizations//*Proceedings of the IEEE Symposium on Information Visualization*. Boulder, USA, 1996: 336-343

[33] Ren Lei, Wang Wei-Xin, Zhou Ming-Jun, et al. A model driven development method for interactive information visualization. *Journal of Software*, 2008, 19(8): 1947-1964 (in Chinese)
(任磊, 王威信, 周明骏等. 一种模型驱动交互式信息可视

化开发方法. *软件学报*, 2008, 19(8): 1947-1964)

[34] Du Yi, Ren Lei. DaisyVA: An intelligent interactive visualization platform for visual analysis of multi-fact information. *Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics*, 2013, 25(8): 1177-1182(in Chinese)
(杜一, 任磊. DaisyVA: 支持信息多面体可视分析的智能交互式可视化平台. *计算机辅助设计与图形学学报*, 2013, 25(8): 1177-1182)

[35] Ren Lei, Cui Jin, Du Yi, Dai Guo-Zhong. Multilevel interaction model for hierarchical tasks in information visualization//*Proceedings of the 6th International Symposium on Visual Information Communication and Interaction*. Tianjin, China, 2013: 11-16



REN Lei, born in 1979, Ph. D. , associate professor. His research interests include information visualization, human-computer interaction, cloud computing and cloud manufacturing.

WEI Yong-Chang, born in 1991, M. S. candidate. His research interests include information visualization.

Background

In the research area of information visualization, Focus+Context is an essential human-computer interaction technique that can support efficient exploration of big data within a relatively small user interface. Current research works mainly implement Focus+Context approaches by leveraging Euclidean distances between visual representations to decide the relationships between a focus and its relevant contexts. Although in recent years Prof. George W. Furnas, the proposer of Focus+Context, has suggested that semantics should be introduce into it, we still can't find a theoretical model supporting Focus+Context semantics. This paper

DU Yi, born in 1988, Ph. D. , assistant professor. His research interests include information visualization and human-computer interaction.

ZHANG Xiao-Long, born in 1969, Ph. D. , associate professor. His research interests include knowledge visualization and human-computer interaction.

DAI Guo-Zhong, born in 1944, professor, Ph. D. supervisor. His research interest is human-computer interaction.

establishes a theoretical framework of semantic Focus+Context, defining semantic distance, semantic degree-of-interest, semantic context and semantic Focus+Context user interface model. The proposed theoretical model can contribute to semantics-based intelligent and efficient human-computer interaction especially for visual analysis of big data in relatively small user interfaces. This work is partly supported by the National Natural Science Foundation of China under Grant (Nos. 61103096, 61402435), and the National High Technology Research and Development Program (863 Program) of China (No. SS2015AA042100).