

一种时序数据的可视化技术与工具^{*}

罗雄飞⁺, 王宏安, 田 丰, 戴国忠, 滕东兴

(中国科学院 软件研究所 人机交互技术与智能信息处理实验室, 北京 100190)

Temporal Data Visualization Technique and Tool

LUO Xiong-Fei⁺, WANG Hong-An, TIAN Feng, DAI Guo-Zhong, TENG Dong-Xing

(Intelligence Engineering Laboratory, Institute of Software, The Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

+ Corresponding author: E-mail: lxf@iel.iscas.ac.cn, http://iel.iscas.ac.cn

Luo XF, Wang HA, Tian F, Dai GZ, Teng DX. Temporal data visualization technique and tool. *Journal of Software*, 2009,20(Suppl.):104-112. <http://www.jos.org.cn/1000-9825/09013.htm>

Abstract: Temporal data are widely used in many fields. One of the prominent time series analysis techniques is visualization, which may improve users' ability in information recognition and analysis. However, users tend to fail when analyzing a long time series with existing approaches. This paper presents an approach named FisheyeLines. This visualization technique provides good overviews for large-scale information and details for these focus objects. Meanwhile, the correlation between complex information and properties of objects are easily to be acquired. It also presents a tool named FisheyeLinesVis for developing temporal data visualization application. A user study shows that this approach is efficient and easy to use.

Key words: information visualization; temporal data; human-computer interaction; user interface; Focus+Context

摘 要: 时序数据在许多研究领域中都广泛存在.信息可视化是对时序数据进行分析的有力工具,然而已有的时序数据可视化技术无法较好地分析时间跨度长的时序数据.提出一种称为 FisheyeLines 的可视化技术,能够快速显示大数据集的整体视图,同时方便查看细节信息;能够清楚地表达复杂信息间的相互关系,同时可以显示对象的属性.基于 FisheyeLines 可视化技术,还给出了一种称为 FisheyeLinesVis 的可视化工具,可以方便地构造时序数据可视化应用.对以上技术和工具所构造的应用实例的分析与评估充分验证了该方法的有效性和易用性.

关键词: 信息可视化;时序数据;人机交互;用户界面;Focus+Context

时序数据是一种复杂类型的数据,它由随时间变化的序列值或事件组成.Shneiderman在文献[1]中就将时间看成是非常重要的维度,他把时序数据看成是 7 种基本的数据之一.长时间跨度时序数据在企业生产、商业、医学界等众多应用领域中大量存在.人们在长时间跨度上对时序数据进行分析,有利于发现和掌握规律.信息可视化技术通过对抽象信息提供交互式的可视化的表示形式,能够增强人们对复杂信息的认知能力^[2],成为人们解释现象、发现规律、辅助决策的强有力工具^[3].长期以来,可视化技术成功地用于分析时序数据等类型的复杂

* Supported by the National Natural Science Foundation of China under Grant No.60703078 (国家自然科学基金); the National High-Tech Research and Development Plan of China under Grant Nos.2006AA04Z182, 2007AA040702, 2007AA04Z113 (国家高技术研究发展计划(863)); the National Basic Research Program of China under Grant No.2006CB303105 (国家重点基础研究发展计划(973))

Received 2008-09-20; Accepted 2009-04-09

数据.

时间是一种测量标准,同时也是一种特殊的维度.在对时序数据进行可视化时,必须专门考虑时间的作用,从而建立起与时间轴的直接的、可视的关联^[4,5].TimeLines^[6]是时序数据可视化中最常见的可视化技术之一,容易使人们看到一段时间内发生的事件及事件间的关系.LifeLines^[6]可用于对患者病历信息进行可视化分析,但并没有提供方法来发现多个实体间的模式.AuctionExplorer^[7]可用于对在线拍卖的时序数据及其属性进行可视化,然而并不能对数据相关的多个属性进行直接的可视化.TimeLines的常见问题是需要显示的数据量太大,难以实现在一个屏幕里显示全部数据的同时又显示重要的细节信息.为了解决这个问题,Mackinlay等人提出了透视图技术^[8],这是一种focus+context的交互技术,它使用透视去压缩边界的信息,可以同时多个实体的单一属性进行可视化,但不能对实体的多个属性进行可视化.McLachlan等人^[9]使用带有语义缩放技术的图表矩阵来对系统管理的时序数据进行可视化,这种多视图的技术可对多个实体的多个属性进行比较分析.但由于用户需要在多个视图中浏览数据,注意力与工作记忆的频繁切换将导致效率降低.

目前,交互式信息可视化应用的设计与实现仍然十分困难,对于交互式信息可视化中应用的各种可视化技术、交互技术,需要对各种算法进行繁琐、重复的开发,这一问题阻碍了信息可视化的应用^[10,11].为了简化对于具体领域应用的创建过程,研究人员开发了Information Visualizer^[12],Prefuse^[10],InfoVis^[11],IVCI^[13],Piccolo^[14],Daisy^[15].它们都旨在提供通用开发方法与工具平台,用于快速构建交互式可视化应用.但是已有的这些工具箱由于没有考虑时间的特殊作用,不能满足时序数据可视化中需要在时间轴上进行浏览和缩放等要求,因此对时序数据可视化应用的支持有限.

基于上述问题,本文提出一种称为 FisheyeLines 的可视化技术,可以实现对长时间跨度时序数据的可视化,并可以对不同实体间的时序数据进行比较.基于 FisheyeLines 可视化技术,本文还给出了一种称为 FisheyeLinesVis 的可视化工具,可以方便地构造时序数据可视化应用.实例表明,FisheyeLines 可以快速显示大数据集的整体视图,并可同时方便查看细节信息;能够清楚地表达复杂信息间的相互关系,并可同时显示对象的属性.

1 FisheyeLines

1.1 兴趣程度函数(DOI)

Furnas^[16]指出,鱼眼视图的结构中应该定义3个属性:焦点“.”;与焦点的距离: $D(.,x)[D,..]=0$;细节、重要性、分辨率的级别 $LOD(x)$.然而,Furnas在文中只给出了树型结构的DOI的实现函数 $DOI(x)=(LOD(x)-D(.,x))$.针对时序数据而言,这个实现函数显然无法描述用户的兴趣程度.下面我们针对时序数据给出相应的DOI函数.

定义 1(时间段). 用户为分析时序数据所定义的时间区间,同一时间段里的时序数据将被用户集中分析.这种时间间隔使用两个时间点为上、下限,记为 $[T_{start}, T_{End}]$.

定义 2(时间实体). 随着时间的变化,自身的属性发生改变的一种实体.用户可通过时序实体将时序数据组织起来进行分析.时序实体 $TE=(T,EAD)$,其中, T 是时间段的集合; EAD 是属性 $A_1 \times \dots \times A_k$ 上 k 元谓词的集合,其中, $A_i(1 \leq i \leq k)$ 是时序实体 TE 的一个属性.

时序数据可视化的 DOI 函数的组成部分定义如下:

(1) 焦点“.”为所关注时间段的当前时序实体,它将被赋予最高的 DOI 值.

(2) 某个点与焦点之间的距离 $D(.,x)$ 则需要考虑以下两个方面:一方面是,时间上的距离 $PD(.,x)$.同一时间段内的点距离相同,即 $PD(.,x_1)=PD(.,x_2)(x_1 \& x_2 \in \text{同一时间段})$; $PD(.,x_1) < PD(.,x_2) < PD(.,x_3)(\& x_1 \in \text{同一时间段}, \& x_2 \in \text{邻近时间段}, \& x_3 \in \text{非邻近时间段})$,这是因为时间段之间的关系往往较弱,因此距离也就相对较远;另外,也考虑到时间距离,时间间隔越大的点距离相对较远.另一方面是时序实体的距离 $LD(.,x)$.同一时序实体内的时序实体距离相同,即 $LD(.,x_1)=LD(.,x_2)(x_1 \& x_2 \in \text{同一时序实体})$.这是因为同一时序实体内的数据进行可视化时往往需要同时进行分析. $LD(.,x_1) < LD(.,x_2) < LD(.,x_3)(\& x_1 \in \text{同一时序实体}, \& x_2 \in \text{邻近时序实体}, \& x_3 \in \text{其他时序实体})$.这是因为时序实体间的关系相对较弱,而且考虑它们之间的距离,把关系较密切或需要同时进行查看的时序实体安

排在邻近位置,而把其他关系较远的时序实体安排在较远的位置.

$D(.,x)$ 由上述两个距离组成,即 $D(.,x)=PD(.,x)+LD(.,x)$.

(3) $LOD(x)$ 需要考虑到时序数据的特殊性.一是重要程度,可以根据分析任务的要求定义各时序属性的 $LOD(x)$ 值;二是细节:对于焦点的数据,可以给出更多细节信息以便于数据分析. $LOD(x)=-D(f,x)$ (f 为 x 所在时间段所对应的焦点时序实体).

由以上定义容易得到 FisheyeLines 的 DOI 函数:

$$DOI(x)= (LOD(x)-D(.,x))(LOD(x)=-D(f,x),D(.,x)=PD(.,x)+LD(.,x)) \rightarrow DOI(x)= -((D(f,x)+PD(.,x)+LD(.,x)))$$

基于(2)中这些焦距,FisheyeLines通过传播DOI值来计算每个对象的DOI值,正如Card等人^[17]所描述的,计算一个DOI值近似从焦点到每个对象的语义距离.DOI值被指定到每个对象上,然后被用于对可视化部分的视图进行布局并决定对象的可视化表现.

1.2 可视化结构

由于时序数据往往表现出数据量巨大、关系复杂等特征,因此需要考虑在有限屏幕内有效显示的可视化方法.Bade等人给出了一种3个相互联接的TimeLines技术^[18],可以提供3个粒度上时间的导航.然而该技术并没有提供语义缩放,对多时序实体分析任务的支持也有限.我们设计了鱼眼TimeLines,它由3种区域组成:正常区(free layout zone)、压缩区(compression zone)和折叠区(aggregation zone),如图1所示.这样保证了整个时间范围内的相关时序数据都可以显示在屏幕里,同时,4个区域保持了完整的上下文关系,并保证了时间的连续性.可以重点显示用户焦点时间段内焦点时序实体内的数据,也可以分析相关时间段和相关时序实体间的联系.

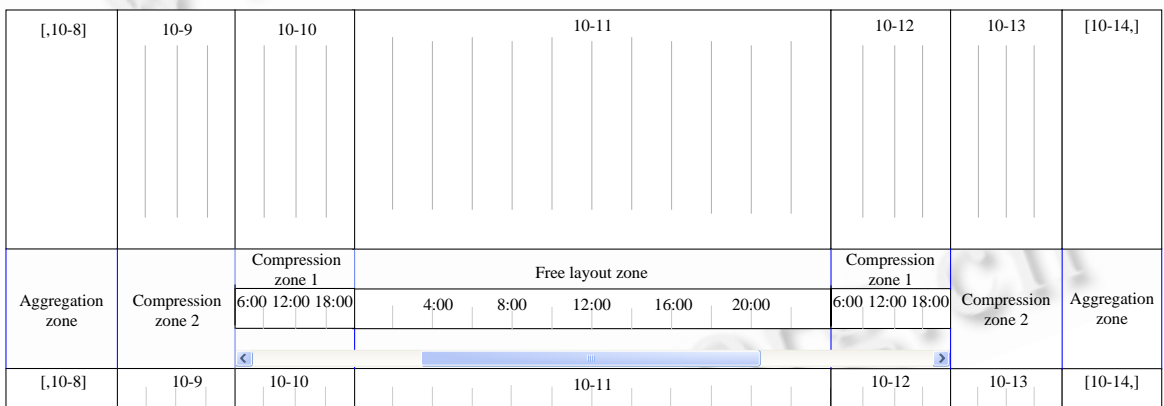


Fig.1 Fisheye TimeLines

图1 鱼眼 TimeLines

对象的最终显示方式是由所计算 DOI 值与指定的阈值 k 进行比较所确定的.用户可以通过调整阈值 k 来交互式地调整数据显示方式,在有限的输出屏幕内探索大量信息.我们主要设计了3种显示方式:(1) 完全显示方式:这种显示方式的对象将显示其所有的详细信息,只有焦点对象使用这种完全显示方式.(2) 缩略显示方式:这种显示方式的对象将显示其缩略信息,将用于焦点时序实体的邻近时序实体、焦点时序实体的邻近时间段以及焦点时序实体的非邻近时间段.(3) 图标显示方式:这种显示方式的对象将只显示代表其存在的图标.当要将太多的对象放在有限屏幕空间进行显示时,我们隐藏了低 DOI 值的对象.这些被隐藏的对象主要是指与焦点时序实体相同时间段的非邻近时序实体等.它们将通过聚合的节点进行表现.

DOI 的 TimeLines 动态地随着分析者的兴趣变换而变换.当用户点击了一个对象,指明了一个搜索条件或将一个对象加到相关对象集合中时,需要立即重新计算所有对象的 DOI 值,并重新布局,产生一个更新的视图.同时,从原有视图到现有视图的转换将是一个动态的过程.这种动态切换的方法将有利于用户跟踪变换过程.通过所提供的连续性特点,可以帮助分析者重用他对组织和布局的空间记忆.

1.3 交互式技术

交互在整个可视化过程中也非常关键.为了让用户探索他们所关心的数据,FisheyeLines 不仅直观、有效地表达了大量复杂的时序数据,而且支持有效的交互技术.一方面提供了整体信息和细节信息(overview+detail)、焦点和上下文(focus+context);另一方面支持缩放和平移(zoom+pan).

FisheyeLines 采用 DOI 的技术,即使整个时间跨度很长,时序实体很多,都能够在有限的空间内提供一个整体结构信息.DOI 计算值较高的对象都包含丰富的细节信息.图 2 给出了一个整体信息和细节信息示例,可以看到,多数细节信息能直观地显示出来,而当我们把焦点停留在该对象上时,其他细节信息就能全部显示出来.

历史事件往往很复杂,进行分析时只关注直接相关的几个属性或变量是远远不够的,上下文信息对于理解历史事件也起着很重要的作用,焦点可通过上下文来改变.图 3 给出了一个焦点和上下文示例.通过该图可以看出,FisheyeLines 支持两种上下文交互技术,一种是横向上下文,即追踪各时间段间的关联,逐时间段地探索信息;另一种是纵向上下文,即追踪同时间段各时序实体间的关联,平滑地探索当前焦点的相关时序实体的信息.

根据时间的独特性,需要支持缩放和平移(zoom+pan),因此浏览时间轴和在不同时间粒度上进行切换是重要的.FisheyeLines 中的时间轴可以在几个级别的细节上进行选择,从而给出不同时间粒度上的视图.图 4 给出了一个视图放大示例,我们可以通过选择较小的时间粒度来放大视图;同样,我们可以通过选择较大的时间粒度来缩小视图.图 5 给出了一个视图平移示例,我们可以通过简单地拖动 TimeScoll 来实现视图平移.



Fig.2 Example of overview+detail

图 2 overview+detail 示例

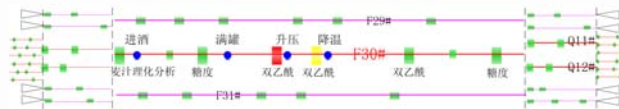


Fig.3 Example of focus+context

图 3 focus+context 示例

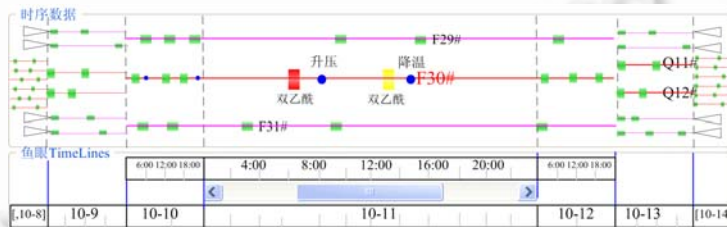


Fig.4 Example of zoom

图 4 zoom 示例

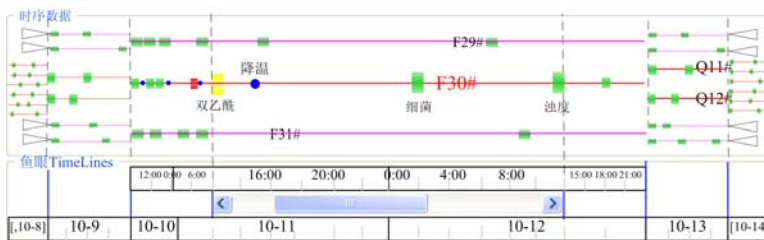


Fig.5 Example of pan

图 5 pan 示例

2 工具设计

尽管信息可视化技术已被证明是理解复杂数据的一种重要的技术,但是要将信息可视化技术应用来具体的领域还存着不少困难.为了在构建具体的领域应用中对 FisheyeLines 进行快速的移植和复用,避免用户从头开始进行开发,我们建立了 FisheyeLinesVis.FisheyeLinesVis 是一个可以对 FisheyeLines 中所包含的可视化技术和交互技术进行集成的工具,能够方便用户对应用进行定制,可以灵活选择和组合所提供的组件,从而简化对具体领域应用的创建过程.

2.1 框架结构设计

为了可以足够灵活地支持具体应用领域的创建并提供良好的可扩展性和易用性,我们将在已有信息可视化模型^[2,19]基础上来设计FisheyeLinesVis.这些模型将信息可视化看成是从数据到可视化形式再到人的感知系统的可调节的映射过程.已经有学者基于这种分解的映射过程来构建信息可视化工具集^[10],但是由于这种通用的信息可视化工具集没有考虑时间作为特殊维度这一特点,因此无法为时序信息可视化的应用开发提供有效的支持.

正如 Card 所述^[2],信息可视化是从数据到可视化形式再到人的感知系统的可调节的映射过程.在 FisheyeLinesVis 中,从原始数据到人的感知系统,其间要经历一系列数据变换.用户可以通过交互控制来调整这些变换.FisheyeLinesVis 的框架结构设计如图 6 所示.

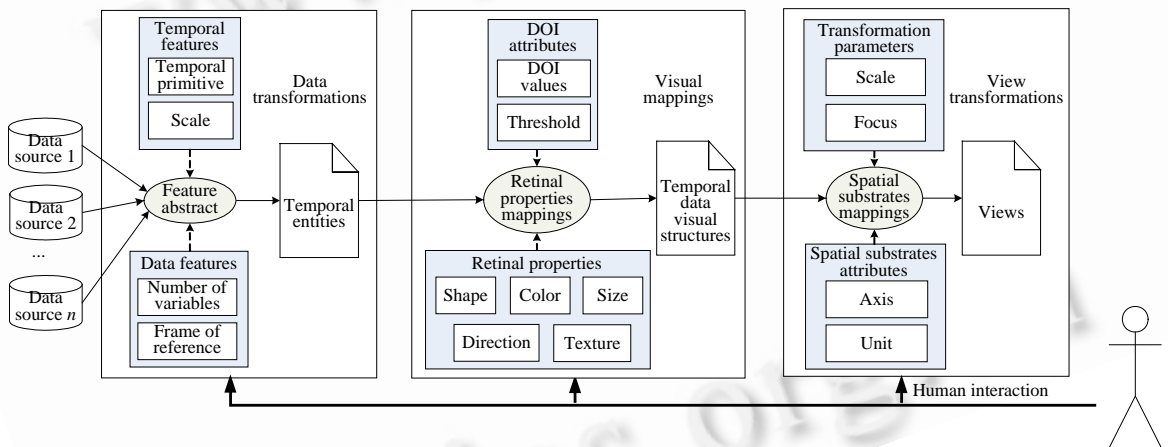


Fig.6 Framework design diagram

图 6 框架结构设计图

在最初的数据变换(data transformation)阶段,需要将异构数据源中的原始数据转换成统一的时序实体.转换过程中的特征提取主要包括两种类型特征的提取,即时间特征(temporal feature)提取和数据特征(data feature)提取.在提取时间特征时,FisheyeLinesVis 需要考虑以下两个方面:一是时间元(temporal primitive)方面,包括时间点或时间间隔;二是粒度(scale)方面,包括单一粒度或多粒度.而在提取数据特征时,FisheyeLinesVis 则需要考虑以下两个方面:一是变量数(number of variable)方面,包括单一变量时序数据与多变量时序数据;二是空间参考(frame of reference)方面,包括抽象数据与时空数据.在这里,我们的时空数据并不是地理信息系统中的时空数据,而是指那些含有影响可视化时空基的属性的时空数据.转换后所统一的时序实体(temporal entity)可以看成是对信息可视化参考模型^[2]中数据表(DataTable)的扩展.

在可视映射(visual mapping)阶段,时序实体将被映射为时序数据可视化结构(temporal data visual structure).视觉属性的映射(retinal property mapping)将主要根据上下文所计算的 DOI 值(DOI value)及所设定的阈值(threshold)来决定各时序实体中时间对象的视觉属性(retinal property),包括形状(shape)、颜色(color)、尺寸

(size)、方向(direction)、材质(texture)等。

在视图变换(view transformation)阶段,时序数据可视化结构被映射为视图(view),并在输出设备上显示.空间作为有度量结构的容器,可使用时间轴及其属性来进行描述.FisheyeLinesVis 的时间轴为线性时间轴,这种时间轴是全部或部分时间元的顺序集合.时间轴的刻度值(unit)需要根据鱼眼 TimeLines 可视化结构的设计来进行绘制,这样既可以保证整个时间范围的时间轴都显示在屏幕里,也可以保证焦点时间段被重点显示.空间基映射还需要考虑变换参数,这主要包括粒度值和焦点。

用户可以交互式地控制可视化过程的各个阶段的变换参数来发现可视模式.在数据变换阶段,用户可以通过控制一些部件(widget)来进行过滤与选择需要在可视化结构显示的数据;在可视映射阶段,用户对可视化结构的直接操纵将改变视觉属性的映射;在视图变换阶段,用户可以通过选择时间粒度和变换焦点等方式完成对视图的交互。

2.2 组件结构设计

FisheyeLinesVis工具在GDI+与Piccolo.NET^[14]工具包的基础上增加了DOI算法实现、时序对象图形节点等众多组件.整个组件结构设计如图 7 所示,包括功能类模块和系统类模块。

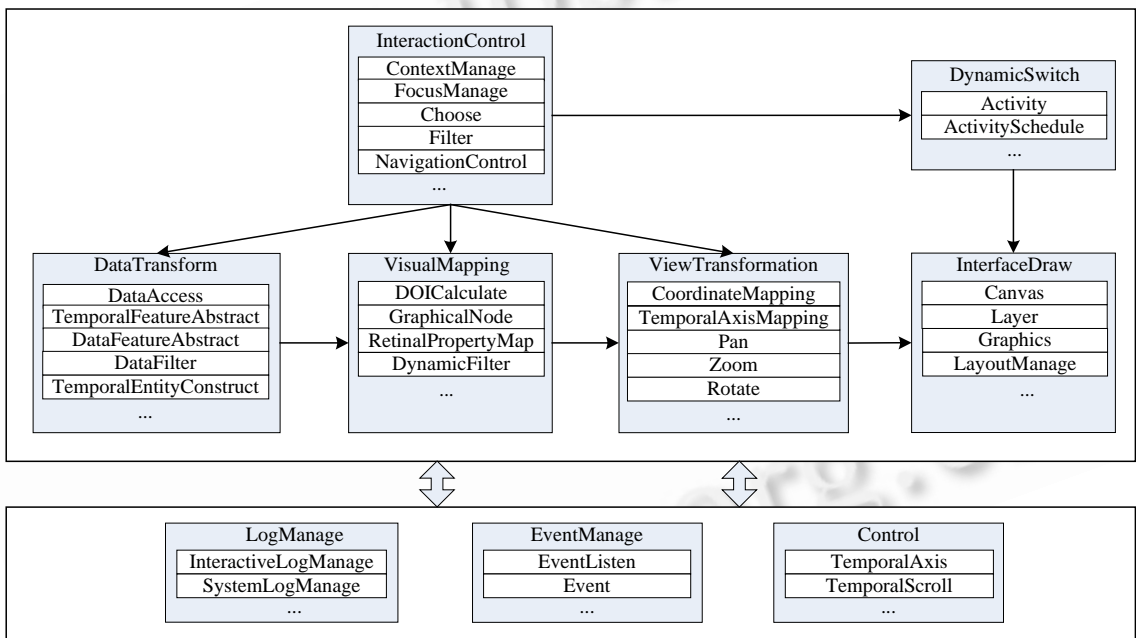


Fig.7 Component design diagram

图 7 组件结构设计图

功能类模块包括交互控制模块(InteractionControl)、动态切换模块(DynamicSwitch)、数据变换模块(DataTransform)、可视映射模块(VisualMapping)、视图变换模块(ViewTransformation)、界面绘制模块(InterfaceDraw)这6个模块.交互控制模块将启动可视化中的一系列映射.首先,由数据变换模块执行相应的映射功能.数据访问组件(DataAccess)可以对异构数据源进行统一访问,并由时间特征提取组件(TemporalFeatureAbstract)和数据特征提取组件(DataFeatureAbstract)分别对原始数据的时间特征和数据特征进行提取,经过数据过滤组件(DataFilter)进行指定特征属性过滤后由时序实体构造组件(TemporalEntityConstruct)转换为统一的时序实体.然后,可视映射模块开始执行相应的映射功能.交互控制模块的上下文管理组件(ContextManage)与焦点管理组件(FocusManage)分别将上下文信息与焦点信息传给 DOI 算法组件(DOICalculate),由 DOI 算法组件结合数据变换模块转换后的时序实体相关信息进行 DOI 值的计算,视觉属性映

射组件根据系统设置或用户交互设置的阈值通过图形节点组件(GraphicalNode)来构造时序数据的可视化结构,用户可以进一步地通过交互控制模块获得视觉属性相关过滤信息后由动态过滤组件(DynamicFilter)进行过滤,从而阻止不符合用户意愿的信息进入可视化过程的下一阶段.接下来,视图变换模块开始完成相应的映射功能.可视化结构中的各图形节点将根据其时序数据的时间元信息,通过时间轴映射组件(TemporalAxisMapping)与性线时间轴建立关联,并通过坐标系映射组件(CoordinateMapping)建立空间位置信息.用户可以通过交互控制模块中的选择组件(Choose)、导航控制组件调用平移组件(Pan)、缩放组件(Zoom)、旋转组件(Rotate)来进行交互式的视图变换.变换后的视图将由界面绘制模块的各个组件进行绘制并输出.在绘制之前,各个图形变换的活动将由动态切换模块进行记录,当活动启动时,活动调度组件(ActivitySchedule)将根据交互控制模块的交互信息对各活动进行调度,完成视图间的动态转换,从而保证了连续性.

系统类模块包括日志管理模块(LogManage)、事件管理模块(EventManage)、控件模块(Control)这3个模块.日志模块提供了交互日志和系统日志管理的功能;事件管理模块对事件进行监听并通知相关组件适时处理所注册的事件;控件模块则提供了 FisheyeLines 可视化技术相关的时间轴组件(TemporalAxis)和时间滚动条组件(TemporalScroll).系统类模块为功能类模块提供了统一的系统支撑.

3 基于 FisheyeLines 的应用构造

利用 FisheyeLinesVis 可以方便地构造交互式时序信息可视化系统.目前利用 FisheyeLinesVis 开发了多个流程企业的交互式时序信息可视化原型系统.

流程企业的生产特点表现为高度复杂的连续作业,产品生产过程复杂,主要包括啤酒、石化、冶金等企业.以啤酒企业生产啤酒为例,其时间跨度为1个月左右,且生产过程中包含大量的时序数据,如过程操作数据、生产执行数据、质检数据等.而石化企业生产汽柴油等产品时,除了包含类似时序数据以外,各个工段中还包含多个子工序,且往往在前一工序未结束时,后一工序的生产已经开始.

如何理解这些长时间跨度时序数据,成为企业生产管理者的共同挑战.在 FisheyeLines 可视化技术的基础上,我们访谈了相关企业的生产管理专家,并结合他们的意见使用 FisheyeLinesVis 工具开发了相应的原型系统.原型系统的界面由3个主要部分组成:一个可视化区域、一个搜索界面和一个鱼眼 TimeLines.用户可以在搜索界面中选择初始的搜索条件,并通过可视化区域中的 TimeScroll 在时间轴上浏览,也可以对视图上的各时序实体和时序对象进行直接操纵,实现对时序数据的交互式可视化探索.图8给出了原型系统在啤酒企业与石化企业的应用实例.

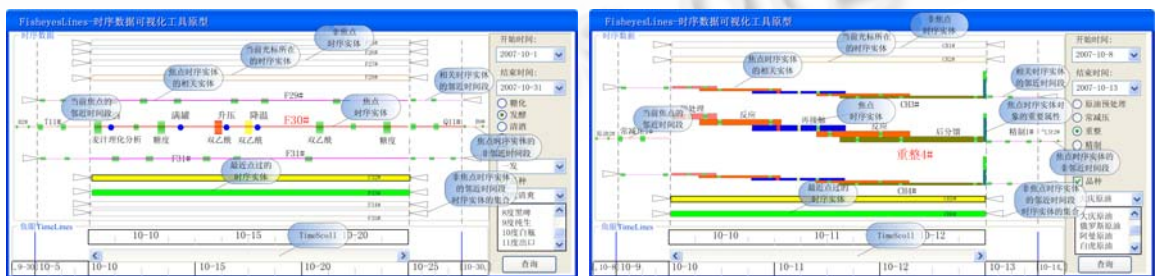


Fig.8 FisheyeLines prototype interface samples of petrochemical enterprise and beer enterprise

图8 FisheyeLines 原型系统界面图-石化企业与啤酒企业应用实例

4 分析与评估

我们对本原型系统帮助分析问题的能力进行了评估.问题分为两类,一类是基本的时序信息可视化任务,如指定的时序对象是否存在、所处的时间等;另一类是较为复杂的时序信息可视化任务,如同一时序实体不同时间上属性的比较、邻近时序实体相关属性的比较等.我们邀请了一组行业专家对原型系统进行使用.他们用10

分钟学习了系统的操作,然后完成了上述一系列任务,最后他们需要回答一份有关系统的满意度问卷.评估结果表明,用户对于原型系统的界面和交互方式是满意的(平均分为 6.35 分,满分为 7 分).这是因为 FisheyeLines 可视化技术的交互方式是一种直接面向内容的交互方式,它是通过鼠标在特定的信息上进行直接操纵.在这种交互方式下,用户所关注的是当前执行的任务和内容本身.用户的动作直接作用在内容上,操作过程与内容并不分离.系统会自动地将用户的交互动作转变为任务执行的命令.这种方式不需要用户关注任务的执行过程.避免了所关注的焦点发生变化.从而能够减轻用户的认知负担,提高操作效率.同时,我们发现第 2 类问题的得分(6.7 分)高于第 1 类问题的得分(6.0 分).这是因为第 2 类问题分析更多地表现在对长时间跨度时序数据及多时序实体间时序数据的关系的理解上,FisheyeLines 可视化技术较好地解决了这个问题.

用户在使用后也提出了自己的建议.大多数用户认为时间粒度的选择及对象所对应的准确时间的直接获取功能很重要,应该加强这一方面的功能;也有用户认为对于时序对象的重要属性为数字的,可以用标记形式显示出来;还有用户认为加上一些图例说明可以减少学习的时间,并可在操作时进行指导.这些用户意见有利于我们对系统进行修改和完善.

5 结 论

时序数据的可视化可以帮助人们从时序数据中发现规律,增强认知能力.但是已有技术并不能很好地对长时间跨度时序数据进行可视化.本文给出了一种基于 DOI 的 FisheyeLines 可视化技术和 FisheyeLinesVis 工具,可以较好地解决这一问题.通过对应用实例进行评估,验证了该技术的有效性和易用性.

致谢 在此,我们衷心感谢中国科学院软件研究所刘伟、任磊、吕菲等同志对本文工作的参与和支持.

References:

- [1] Shneiderman B. The eyes have it: A task by data type taxonomy for information visualizations. In: Proc. of the IEEE Symp. on Visual Languages. Boulder: IEEE Press, 1996. 336–343.
- [2] Card SK, Mackinlay JD, Shneiderman B. Readings in Information Visualization: Using Vision to Think. San Francisco: Morgan Kaufmann Publishers, 1999.
- [3] Wang WX, Dai GZ. Information visualization. Advances in Information Science, 2006,6:80–118 (in Chinese with English abstract).
- [4] Plaisant C, Milash B, Rose A, Widoff S, Shneiderman B. LifeLines: Visualizing personal histories. In: Proc. of the ACM Human Factors in Computing Systems. ACM Press, 1996. 392–393.
- [5] Card SK, Robertson GG, Mackinlay JD. The information visualizer, an information workspace. In: Proc. of the ACM Conf. on Human Factors in Computing Systems. ACM Press, 1991.181–188.
- [6] Silva SF, Catarci T. Visualization of linear time-oriented data: A survey (extended version). Journal of Applied System Studies, 2002,3(2):310–319.
- [7] Aigner W, Miksch S, Müller W, Schumann H, Tominski C. Visualizing time-oriented data—A systematic view. Computers & Graphics, 2007,31:401–409.
- [8] Shmueli G, Jank W, Aris A, Plaisant C, Shneiderman B. Exploring auction databases through interactive visualization. Decision Support Systems, 2006,42:1521–1538.
- [9] Mackinlay JD, Robertson GG, Card SK. The perspective wall: Detail and context smoothly integrated. In: Proc. of the SIGCHI Conf. on Human factors in computing systems: Reaching through technology. New York: ACM Press, 1991. 173–176.
- [10] McLachlan P, Munzner T, Koutsofios E, North S. LiveRAC: Interactive visual exploration of system management time-series data. In: Proc. of the SIGCHI Conf. on Human Factors in Computing Systems. New York: ACM Press, 2008. 1483–1492.
- [11] Heer J, Card SK, Landy JA. Prefuse: A toolkit for interactive information visualization. In: Proc. of the SIGCHI Conf. on Human Factors in Computing Systems. New York: ACM Press, 2005. 421–430.

- [12] Fekete JD. The InfoVis toolkit. In: Proc. of IEEE Symp. on Information Visualization. Washington: IEEE Computer Society Press, 2004. 167–174.
- [13] Borner K, Zhou Y. A software repository for education and research in information visualization. In: Proc. of the 5th Int'l Conf. on Information Visualization. Los Alamitos: IEEE Computer Society Press, 2001. 257–262.
- [14] Bederson BB, Grosjean J, Meyer J. Toolkit design for interactive structured graphics. IEEE Trans. on Software Engineering, 2004, 30(8):535–546.
- [15] Ren L, Wang WX, Zhou MJ, Teng DX, Ma CX, Dai GZ, Wang HA. A model-based development method for interactive information visualization. Journal of Software, 2008,19(8):1947–1964 (in Chinese with English abstract). <http://www.jos.org.cn/1000-9825/19/1947.htm>
- [16] Furnas G. The FISHEYE view: A new look at structured files. Technical Memorandum, #81-11221-9, Murray Hill: Bell Laboratories, 1981.
- [17] Card S, Suh B, Pendleton B, Heer J, Bodnar J. TimeTree: Exploring time changing hierarchies. In: Proc. of the IEEE Symp. on Visual Analytics Science and Technology. Baltimore: IEEE Press, 2006. 336–343.
- [18] Bade R, Schlechtweg S, Miksch S. Connecting time-oriented data and information to a coherent interactive visualization. In: Proc. of the SIGCHI Conf. on Human Factors in computing systems. Vienna: ACM Press, 2004. 105–112.
- [19] Chi EH, Riedl JT. An operator interaction framework for visualization systems. In: Proc. of the Symp. on Information Visualization. Los Alamitos: IEEE Computer Society Press, 1998. 63–70.

附中文参考文献:

- [3] 王威信,戴国忠.信息可视化.情报学进展,2006,6:80–118.
- [15] 任磊,王威信,周明骏,滕东兴,马翠霞,戴国忠,王宏安.一种模型驱动的交互式信息可视化开发方法.软件学报,2008,19(8):1947–1964. <http://www.jos.org.cn/1000-9825/19/1947.htm>



罗雄飞(1977—),男,湖南邵东人,博士生,工程师,主要研究领域为人机交互技术,实时智能.



王宏安(1963—),男,博士,研究员,博士生导师,主要研究领域为人机交互技术,实时智能.



田丰(1976—),男,博士,副研究员,主要研究领域为人机交互技术,虚拟现实,笔式计算.



戴国忠(1944—),男,研究员,博士生导师,主要研究领域为人机交互技术,计算机图形学.



滕东兴(1973—),男,博士,副研究员,主要研究领域为人机交互技术,虚拟现实技术,计算机辅助设计.