

## 影像资源的复球面放射树可视组织与交互技术\*

滕东兴<sup>1+</sup>, 闫奎名<sup>1,2</sup>, 樊银亭<sup>1,2</sup>, 马翠霞<sup>1</sup>, 戴国忠<sup>1</sup>, 王宏安<sup>1</sup>

<sup>1</sup>(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)

<sup>2</sup>(中国科学院 研究生院, 北京 100049)

### Visual Organization and Interaction Technique for Large Scale Images with Complex Sphere Radial Tree

TENG Dong-Xing<sup>1+</sup>, YAN Kui-Ming<sup>1,2</sup>, FAN Yin-Ting<sup>1,2</sup>, MA Cui-Xia<sup>1</sup>, DAI Guo-Zhong<sup>1</sup>,  
WANG Hong-An<sup>1</sup>

<sup>1</sup>(Intelligence Engineering Laboratory, Institute of Software, The Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

<sup>2</sup>(Graduate University, The Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

+ Corresponding author: E-mail: dongxing@iscas.ac.cn

Teng DX, Yan KM, Fan YT, Ma CX, Dai GZ, Wang HA. Visual organization and interaction technique for large scale images with complex sphere radial tree. *Journal of Software*, 2012, 23(Suppl. (2)): 21-33 (in Chinese). <http://www.jos.org.cn/1000-9825/12021.htm>

**Abstract:** A complex sphere radial tree visualization technique is proposed for visualizing large scale unstructured images based on stereographic mapping. The requirement model of visual organization and interaction for hierarchical images is first studied. Next, a hierarchical organization pattern is proposed, and layout algorithm is introduced for the visualization technique based on modified radial tree method and stereographic mapping. It gives the application instance of this technique on large-scale medical images. Results show that this visualization method can illustrate image contents while preserving global context in a certain space and provides powerful and effective support for users' analysis.

**Key words:** large scale image; unstructured data; visualization; human-computer interaction; radial tree

**摘要:** 针对海量影像资源可视组织与交互问题,提出了一种复球面放射树可视化技术。首先调研了相关工作;然后研究了面向海量影像资源的可视组织与交互技术需求模型;其次给出了基于相似度的影像数据层次组织模型,并介绍了一种基于改进二维平面放射树和球极映射方法的三维球放射树可视化技术及其布局算法;最后针对海量的医疗影像数据进行了实验验证,结果表明:该方法可在相对较小的显示空间内,展示节点细节,兼顾节点的上下文语境;提供的交互任务具有较好的交互效率和较高的用户满意度。

**关键词:** 海量影像资源;非结构化数据;可视化;人机交互;放射树

随着互联网技术的发展,大量的非结构化信息,如文本、影像、视频等逐渐走入人们的视野,数据科学家也

\* 基金项目: 国家自然科学基金(61173057, 61100162); 国家高技术研究发展计划(863)(2012AA02A608); 国家科技支撑计划(2012BAE05B05); 中国科学院软件研究所科技项目(ISCAS-2010-01)

收稿时间: 2012-05-30; 定稿时间: 2012-09-29

开始将研究的重点转移至非结构化信息.其中,医疗影像这种具有复杂层次关系的非结构化数据随着医疗数字化建设的发展而海量出现,并成为医生进行病情分析、临床诊断的重要依据,研究其可视化组织技术,对于医疗经验重用、实现快速诊疗具有重要的现实意义.

目前,针对大型层次结构化信息的可视化,研究人员已经取得了一些成果,如二维平面中基于节点连线图方法的 HyperbolicTree<sup>[1]</sup>,RadialTree<sup>[2]</sup>,基于空间填充方法的 CircleMap<sup>[3]</sup>,Sunburst<sup>[4]</sup>和基于三维空间的 ConeTree<sup>[5]</sup>以及采用 H3 算法<sup>[6]</sup>的三维双曲树等.这些可视化技术在分析结构化信息方面获得了成功,但对于像医疗影像这类非结构化数据,却存在一些不足之处.非结构化数据通常是一种“所见即所得”直观呈现自身内容的数据形式,而上述技术往往采用带有简单标注信息、大小相同的圆点或者矩形来表示节点,不能直观反映节点本身的数据细节.而且,非结构化数据节点通常还包含相互依赖的多个元数据项<sup>[7,8]</sup>,它们也采用层次结构进行组织,是节点信息的重要补充,从而形成一种复杂的层次关系,当前面向结构化数据的可视化技术不能对这种复杂的层次关系进行有效呈现.

为了解决上述问题,以海量的医疗影像数据为应用背景,本文提出了一种复球面放射树的可视化技术.可视技术首先构建影像相似度伸展树,然后采用改进的二维放射树布局算法对伸展树进行布局,最后对平面布局的伸展树进行球极映射,得到复球面放射树.设计空间分配策略,实现一种 Focus+Context 的展示;对不同层次的节点,根据用户关注度分配不同的细节展示空间.其中,焦点区域位于球的顶点,具有最大的细节展示空间;层次较深的节点,展示空间随其关注度的降低而减小.接下来,本文首先研究了医疗影像基于相似度的层次组织模型,然后结合模型给出了复球面放射树的布局算法;最后给出了可视化技术的应用实例和实验评估.实验结果表明,该可视技术可以自然、高效地支持用户对大规模的非结构化层次数据进行交互式细节分析.

## 1 相关工作

如何在有限的空间内展示海量规模的节点,并且在呈现局部节点细节时兼顾全局的视图特征,是层次信息可视化研究要解决的两个重要问题.目前的层次信息可视化技术主要面向结构化数据.如图 1(a)所示,Book 等人<sup>[2]</sup>提出了一种基于放射树的海量层次信息可视方法,可以很好地体现海量节点的层次性,但是该放射树同心圆周长随层次呈线性增长,无法给指数规模增长的树节点足够的展示空间.如图 1(b)所示,Lamping 等人<sup>[1]</sup>提出一种基于平面双曲几何的可视化和操纵大型层次结构的 Focus+Context 技术,称为 Hyperbolic tree.在双曲空间中,圆周长随半径呈指数增长,因此可以给巨型树结构节点分配足够多的展示空间,使得双曲树在显示海量层次信息方面具有较好的效果.嵌套圆(circle tree map)<sup>[3,9]</sup>等方法也用于海量层次信息的可视化,但是空间利用效率较低.

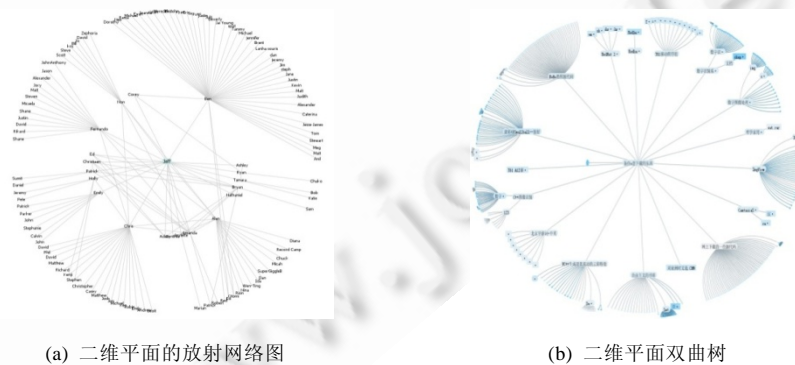


Fig.1 2D view of massive hierarchical information

图1 海量层次信息二维平面可视形态

目前,可视化技术的研究正从二维平面向三维空间迁移,三维空间中海量层次信息的可视化,加强了视觉效果,提高了空间的展示粒度,给用户提供了一种更明显的层次感,在一些应用中具有良好的效果,因此受到了研

究人员的关注<sup>[10]</sup>.而球面三维因其良好的视觉特性和旋转特性,成为研究的热点.比如,图 2(a)展示了一个三维版本的放射树.斯坦福大学的 Munzner<sup>[11]</sup>在三维空间中实现了对大规模准层次化图形的 H3 三维双曲树可视化算法,该方法将绘制的节点有效地映射到半球体上,相比二维双曲树,可以容纳更大规模的节点,如图 2(b)所示;Walrus<sup>[12]</sup>对 H3 算法进行了改进,并采用克莱因映射模型替换了庞加莱圆盘模型,实现了真三维环境下的三维双曲树,支持视点变换等交互操作,被应用于大型网络层次信息的可视展示与分析,如图 2(c)所示.魔眼视图(magic eye view)<sup>[13]</sup>是 SinVis 系统的一部分,如图 2(d)所示,在球面上进行层次节点布局,可以较好地展示节点的层次结构.

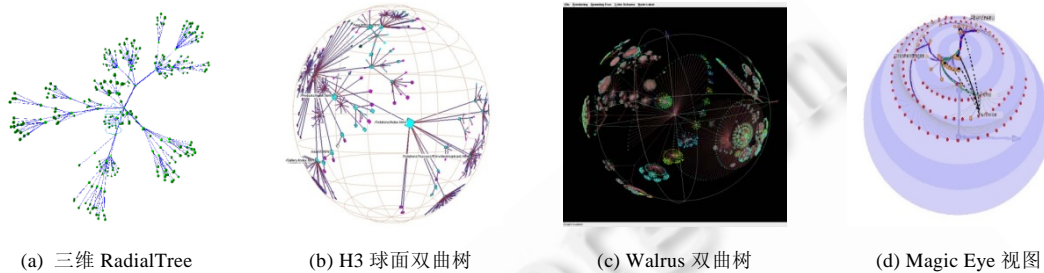


Fig.2 3-Dimensional display of hierarchical information

图 2 层次信息的三维展示

上述研究方法主要面向层次结构化信息,在对医疗影像这种“所见即所得”的非结构化数据进行可视化操作时存在不足.医疗影像,其本身是数据内容的一种可视展示形态,上述可视技术无法承载这种可视形态,也无法对元数据项信息进行有效呈现.而且,在 Focus+Context 可视环境下,要求为不同关注度的节点分配不同的细节展示空间,这些可视形态并不能很好地提供支持.本文的可视化技术基于二维放射树,可以很好地展示节点的层次性.同时,通过设定映射半径,分配给具有不同层次关注度节点不同的三维展示空间,帮助用户在进行节点细节查询的同时,兼顾全局信息.

## 2 海量影像资源可视组织与交互需求分析

### 2.1 影像的可视性研究

信息可视化的重要目标是提供一种数据的增强展示形式以辅助用户的认知,如柱状图、饼状图.但是,相对于传统的如数字、符号等结构化数据,影像作为非结构化数据的重要特征是一种“所见即所得”的可视形态.从物理存储上来看,影像数据是具有明暗指标且本质上是一种无序存储的像素点的集合.视觉二元学说认为,人们认知图像是通过感光细胞感知影像像素点的光强和颜色.基于这种视觉认知,人脑对图像内容进行轮廓提取、运动分析、纹理识别、立体重建等推理分析工作,从而得到对图像内容的理解.为了辅助人们进行图像认知,研究人员提出了一系列方法,如颜色直方图、滤波纹理等,试图采用一种量化的手段对图像内容进行结构化描述,但是这些方法只能从某个侧面来描述图像信息,并且这种量化的数字表达在一定程度上阻碍了人们的图像认知.事实上,对图像内容最为直观、有效的呈现,仍然是图像像素集合本身.研究影像的可视组织与交互技术,最重要的是采用一种“所见即所得”的方式,对影像的像素数据集合进行原始呈现.

### 2.2 面向推荐机制的影像组织

与传统的数据应用有所不同,对影像的分析和利用是一个迭代类比的过程.在影像的处理、分析和应用过程中,往往包含了大量的用户经验和领域知识.对于一个新的影像对象,人们更倾向于从已有的影像集合中寻找相似案例,并借鉴其处理流程和模式.由于现有的数据库技术对非结构化数据存储的支持明显地存在不足,影像更多地是基于文件系统进行存储,采用文件目录树进行组织和管理,并通过对影像内容进行主观描述和命名以实现影像的精确查找.这样的影像组织方式存在很大的弊端,如主观性较强、为了精确描述而采用较长的文件

名从而加重了认知负担等.图像的特征,是对图像某一侧面的客观描述,可以对多种特征进行加权融合来获取图像的内容语义.基于影像内容语义相似度进行影像分层组织,并把相似影像推荐给用户,可以克服传统方法的弊端,提高影像的分析利用效率.

### 2.2.1 影像相似度传递规则

影像之间的相似度具有一种传递性.通过这种传递性,可以把更多的相似影像及其所包含的经验和知识推荐给用户.如图3所示,以影像为节点,影像的相似度为边,构建一个相似度网络,并设定相似度路径阈值 $L$ ,那么影像的相似度传递规则定义如下.

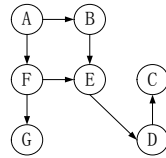


Fig.3 Similarity networks

图3 相似度网络

**规则 1.** 如果两个影像之间只存在一条相似路径长度小于 $L$ ,如图3所示中 $A$ 到 $G$ 存在一条路径,则 $A$ 和 $G$ 节点的相似度为

$$S_{A \rightarrow G} = \text{MIN}(S_{AF}, S_{FG}) \cdot \beta \quad (1)$$

其中, $\beta$ 为路径长度衰减因子,其计算方法为

$$\beta = \frac{L - M + 1}{L} \quad (2)$$

其中, $M$ 为 $A$ 到 $G$ 的相似路径长度.

**规则 2.** 如果两个影像之间存在多条相似度路径,如图3所示中 $A$ 到 $E$ 存在一条路径,则 $A$ 和 $E$ 节点的相似度为

$$S'_{A \rightarrow E} = \frac{\sum_{i=1}^n S_{A \rightarrow E}^i}{n} \quad (3)$$

其中, $n$ 为相似路径数目.

### 2.2.2 基于影像内容语义相似度的组织

目前,多种特征,如轮廓、纹理等,用于描述影像内容以及影像相似度的计算.这些相似度的计算方法具有客观、高效的优点,并且适用于海量影像资源的自动化处理.因此,可以采用这些内容语义相似度来构建影像语义系统,对影像进行组织.根据上述相似度传递原理,本文给出了一种基于内容相似度的影像层次组织方式.其中,层次表征了影像节点之间的相似度路径长度.采用这种方式进行影像组织,根据内容向用户进行影像推荐,可以很好地克服传统影像组织存在的弊端,本文在第3节对这种组织方式进行详细描述.

### 2.3 非结构化数据的分层数据模型

影像数据作为非结构化数据与传统的结构化数据的区别还在于前者包含了多个元数据项.为了对非结构化数据进行描述,Amato等人<sup>[14]</sup>提出了基于语义描述、底层特征、原始数据的分层数据模型,如图4所示.

对于影像数据而言,处于底层的是影像的像素集合;描述模型主要包含了影像的应用场景、分析流程以及领域知识等内容;特征层和语义层基于影像内容的处理,主要包含轮廓、形状以及相似度、标注信息等.这种分层组织模型可以很好地对非结构化数据内容进行描述.在进行影像资源可视展示时,可以有效地对这些内容加以呈现.本文通过分配给数据节点三维的展示空间,来展示这些元数据项及其联系.

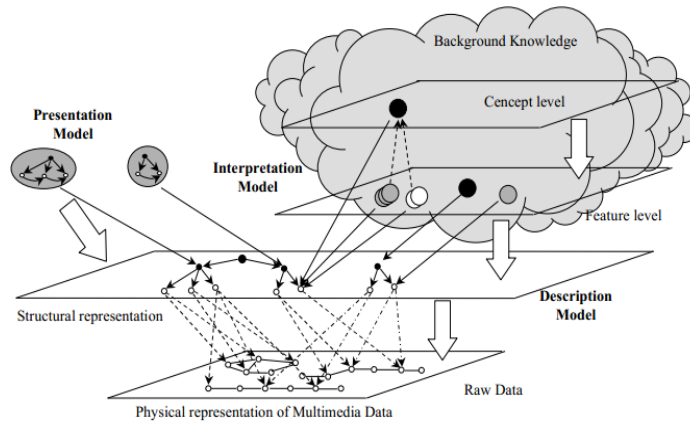


Fig.4 Hierarchical model of unstructured data nodes

图 4 非结构数据节点分层数据模型示意图

### 3 基于复球面放射树的可视组织与交互技术

针对上述需求分析,本文提出了一种复球面放射树技术以进行海量影像资源的组织与交互.该技术基于影像相似度的层次组织模型来进行影像资源的语义组织,采用的放射树布局算法可以很好地体现这种层次性.为了能够在球面上实现一种“Focus+Context”的展示,本文对传统的二维放射树布局算法进行了改进,并给出了新的半径分配策略.映射得到的复球面放射树可以分配节点三维的内容展示空间,并且,球面具有的良好旋转性可以对交互任务进行良好的支持.

#### 3.1 影像数据基于相似度的层次组织模型

对于医疗影像这样一种重要的非结构化信息载体,对其进行快速查找、重用具有重要的现实意义.目前,对于影像数据,仍然采用基于物理逻辑关系的组织和管理方式,如个人电脑上基于文件夹目录树的照片管理,基于网格分布式存储技术的医疗影像数据等;这样的组织模式,没有考虑到影像之间的语义关联,因此难以支持影像的重用和快速查找.影像的物理特征是对影像内容的客观表达,如纹理、形状.目前,通过计算影像特征之间的相似度进行基于内容的影像查询,具有较高的查询效率和可信度.因此,基于影像特征相似度,对海量影像数据采用一种层次型的伸展树方式进行组织,可以更真实地反映影像间的语义关联,进而提高用户对影像的查找速度.对于一副影像,设定一个相似度阈值,并定义除自身外相似度超过阈值的节点为其子节点,这样就可以通过影像之间的相似度和相似度阈值来获取每个影像的子节点集合,采用一种迭代的方式来构建相似度伸展树,如图 3 所示.本文定义影像数据模型为

$$\text{ImageModel} = \langle \text{URL}, \text{ChildList}, \text{SimThreshold}, \text{nCountThr} \rangle,$$

其中,URL 保存了节点实际的物理存储地址,用于对节点的访问;ChildList 为其子节点集合,SimThreshold 为进行父子关系判定的相似度阈值,为了避免树的伸展因子过大,我们设置了 nCountThr 作为节点个数阈值.本文面向医疗影像,针对其特点采用多特征加权融合的相似度计算方法,计算公式为

$$S = W_{\text{Gabor}} \cdot S_{\text{Gabor}} + W_{\text{Hu}} \cdot S_{\text{Hu}} \tag{4}$$

其中,  $S_{\text{Gabor}}$ ,  $S_{\text{Hu}}$  分别对应影像 Gabor 滤波纹理相似度和基于 Hu 不变矩的影像形状相似度,  $W_{\text{Gabor}}$ ,  $W_{\text{Hu}}$  为其对应权重.采用欧氏距离进行特征相似度计算,公式如下:

$$D = \sum_{j=1}^n |(\alpha_j - \alpha'_j)| \tag{5}$$

其中,  $\alpha_j$ ,  $\alpha'_j$  对应两幅影像的特征向量,  $D$  为相似度.相似度伸展树的存储结构如图 5 所示.



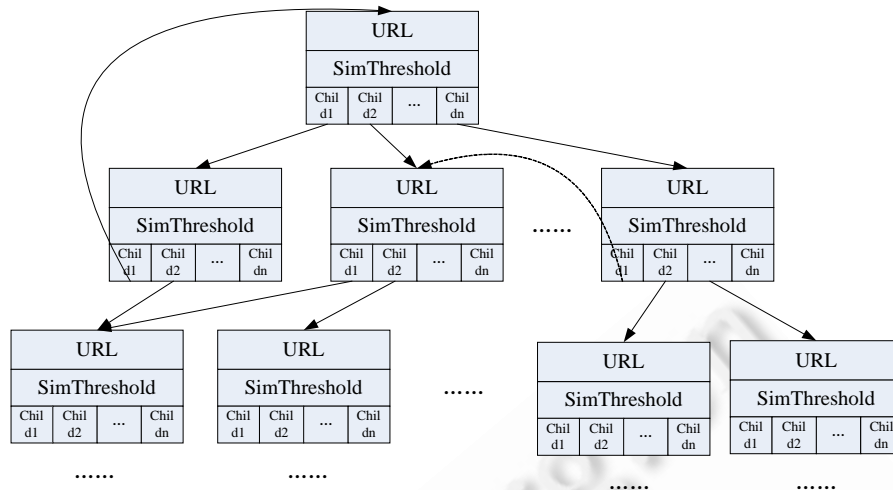


Fig.5 Storage structure

图 5 存储结构示意图

影像的相似度反映了影像间的相互参考价值.在进行影像分析时,这种相似关系往往具有一种传递性,而这种传递性随着传递层次的加深而快速减弱.因此,在进行可视展示的时候,节点相对于根节点的层次,很大程度上表征了节点对于根节点的可参考性.在可视展示中,根据节点的层次分配细节展示空间,以体现这种可参考性的大小.接下来,根据构建的数据模型,对我们的三维球面布局算法加以介绍.

### 3.2 三维球面布局算法

本文所提出的复球面布局算法分 3 个步骤实现,首先,对读入的数据集在假想的二维平面上,采用改进的放射树布局算法进行布局,得到每个节点的平面坐标;然后,进行球极映射<sup>[15]</sup>,计算每个节点在三维球面上的位置;最后,根据层内约束和层间约束,为每个数据节点分配圆柱展示空间,对节点包含的元数据项加以呈现.

#### 3.2.1 确定同心圆半径

放射树同心圆半径大小的分配会影响到复球面放射树节点所具有的展示空间.传统的放射树布局算法,采用一种线性递增的半径分配策略,映射得到的复球面放射树,不满足 Focus+Context 的可视化准则,因为经过映射得到的球面布局,焦点区域没有得到足够的展示空间,而较大的展示空间分配给了处于第 1 层或者第 2 层的节点.为了借助映射后的复球面双曲树实现 Focus+Context 展示,本文提出了一种新的半径分配策略,如图 6 所示.

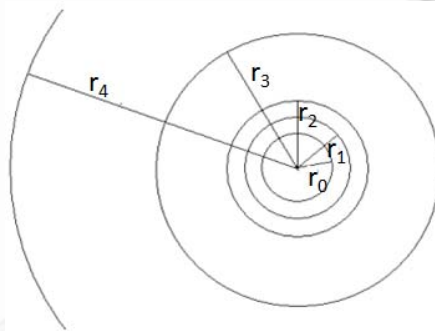


Fig.6 Concentric circles

图 6 同心圆尺寸示意图

假设映射后球面半径为  $R$ ,且截面圆为平面布局的第  $k$  层同心圆(本文中截面圆位于第 3 层),则其余各层的

半径计算公式如下所示:

$$r_i = \begin{cases} \left(1 - \frac{1}{2^i}\right) R, & i < k \\ 2^{i-k} R, & i > k \end{cases} \quad (6)$$

其中, $i$  为同心圆的序号,焦点处于第 0 层;映射后球面空间分配示意图如图 7 所示,从中可以发现,越靠近焦点区域,节点具有的信息展示空间越大,因此可以呈现给用户更为详尽的信息;层次越深,节点分配的空间越小.事实上,影像的相似性传递随层次的加深而迅速减小,因此,在实现的过程中,设定一个层次阈值,当节点层次超过这个阈值时,节点的展示形态退化为传统的带有简单标注信息的圆点或者矩形.采用这样的策略,一方面可以把处于用户关注度边缘的深层次节点作为一种上下文语境提供给用户,另一方面,可以避免图元过多所带来的视觉混乱以及认知负担问题.

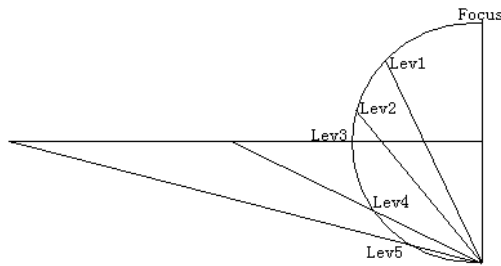


Fig.7 Sphere projection  
图 7 球面映射示意

### 3.2.2 二维平面节点位置计算

对于基于相似度进行层次组织的伸展树,在一个假想的无限平面上,采用改进的放射树布局算法进行布局以获取节点的二维坐标.引入一个六元组来表示二维平面上的一个节点,如下所示:

$$\text{Node2D} = (\text{imageModel}, \text{nLevel}, \text{boolShow}, \text{ArcAngle}, \text{Leftlimit}, \text{Rightlimit}),$$

其中, $\text{imageModel}$  包含了该节点对应的模型数据, $\text{nLevel}$  为节点在平面上布局时相对于焦点的层次, $\text{boolShow}$  标记一个节点是否已经在之前的层次上出现, $\text{ArcAngle}$  为极坐标条件下节点的位置坐标.为了避免在进行节点布局时,存在叶子节点之间的相互覆盖,我们给每个非叶子节点设定了一个范围,即  $\text{Leftlimit}, \text{Rightlimit}$ ,它所有的子节点被限定在这个范围内进行布局<sup>[2]</sup>. $\text{Leftlimit}, \text{Rightlimit}$  的计算示意图如图 8 所示.

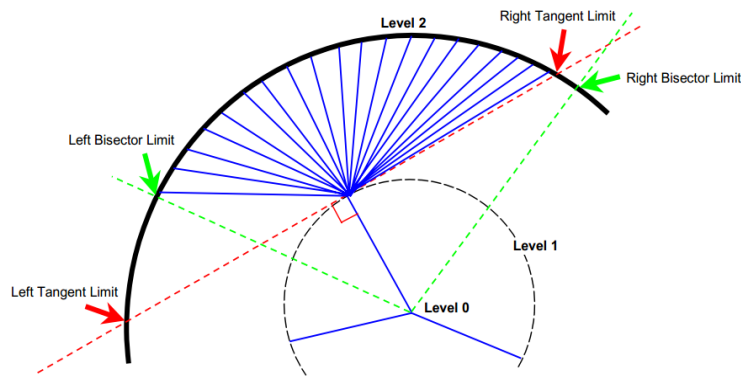


Fig.8 Distribution calculation of the child nodes  
图 8 子节点分布范围计算示意图

节点坐标的计算公式为

$$\begin{cases} x = r_{nLevel} \times \sin(\text{ArcAngle}) \\ y = r_{nLevel} \times \cos(\text{ArcAngle}) \end{cases} \quad (7)$$

二维平面的布局算法是一个迭代的过程,给每个节点设置 boolShow 标志,以防止节点重复出现而陷入无穷循环.迭代布局算法描述如下:

输入:相似度拓扑树,当前焦点;

输出:树的二维布局坐标.

Step 1:置焦点于原点,置焦点 boolShow=True,并把焦点的子节点放入队列 Q,置子节点层次 nLevel=1;

Step 2:如果 Q=NULL,转向 Step 6;否则,取出 Q 队首节点 head,其层次为 headLevel;

Step 3:如果 head 的 boolShow=True,转向 Step 2;否则将 head 的子节点层次置为 headLevel+1,放入队列尾部.如果 headLevel=1,转向 Step 4;如果 headLevel>1,转向 Step 5;

Step 4:统计 headLevel 层节点个数 count,计算节点角度空间 AngleSpace 和 ArcAngle,其中 AngleSpace=(2π/count);节点在同层中次序为 index,ArcAngle=index×AngleSpace;如果节点包含子节点,计算其 Leftlimit,Rightlimit.采用公式(7)计算节点坐标,置 boolShow=True;转向 Step 2;

Step 5:统计其父节点包含的子节点个数 count,并计算父节点的 AngleSpace,AngleSpace=(leftLimit-rightLimit)/count;父节点 ArcAngle 加上次序偏移,得到当前节点的 ArcAngle,采用公式(7)计算节点坐标,置 boolShow=True;如果 head 节点包含子节点,计算其 Leftlimit,Rightlimit;转向 Step 3;

Step 6:算法结束.

得到每个节点的二维坐标.

### 3.2.3 球面投影与空间分配算法

三维球具有良好的旋转特性,可以支持用户从不同角度进行节点细节的查看和分析.并且,平面放射树布局算法是基于同心圆的,在球面上可以完全保留节点的分布特征.本文对二维布局的节点,采用球极映射到一个复球面得到复球面放射树,然后在球体内部分配圆柱展示空间来对节点的元数据项,如属性、语义特征和底层特征进行展示.下面,对映射方法和空间分配策略进行介绍.

• 球极投影.球极映射是一个双射,可以实现复平面到球面的一一对应.人们在认知过程中,更倾向于接受焦点位于球的顶部、自上而下的节点排布层次,以南球极为映射点可视得到这种符合人们认知习惯的球面布局.对于任何一个二维点(x,y),可以表示为一个复数  $z=x+iy$ ;从复平面对这样一个点向半径为  $R$  的球面进行映射,其坐标计算公式为

$$x' = \frac{R^2(\bar{z} + z)}{R^2 + |z|^2}, \quad y' = \frac{R^2(z - \bar{z})}{i(R^2 + |z|^2)}, \quad z' = \frac{R(R^2 - |z|^2)}{R^2 + |z|^2} \quad (8)$$

经过投影,二维平面双曲树的当前焦点被映射到北球极;球面内的节点被映射到上半球,球面外的节点被映射到下半球,如图 9 所示.

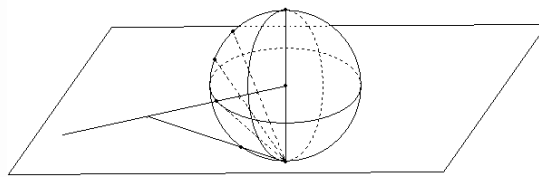


Fig.9 The projection

图 9 投影示意图

根据球极映射的双射性质,可以把二维放射树具有的层次性映射到三维空间,并且能够保留同层节点间的相对位置关系.



• 空间分配.医疗影像,还包含了多个元数据项,如反映患者本身信息的姓名、年龄、性别等,以及反映影像本身的辐射剂量、周期、层厚、床位、窗宽等内容,这些元数据项是对影像本身进行分析的重要参考.此外,医疗影像数据的元数据项内还包含着对电子病历、医疗工作流等实例的引用,这些引用对应于对医疗影像应用场景的描述.如图 10 所示,我们分配给数据节点以三维展示空间来承载和展现这些信息.考虑到球体的对称性,可以采用一个节点空间圆柱来表示一个节点的展示范围.圆柱的体积由高度和直径来决定,下面对圆柱高度和半径的计算方法进行介绍.

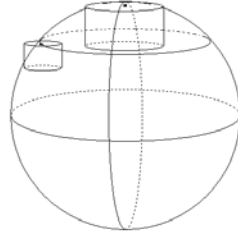


Fig.10 Space allocation

图 10 空间分配示意图

圆柱的高度体现为相邻层之间的高度之差,第  $i$  层圆柱高度为  $Height_i$ ,则其计算公式为

$$Height_i = \frac{2R^3(r_{i+1}^2 - r_i^2)}{(R^2 + r_i^2)(R^2 + r_{i+1}^2)} \quad (9)$$

其中,  $r_i$  为二维布局中第  $i$  层同心圆半径,  $R$  为球面半径.

圆柱的直径共有两个约束条件:

(1) 为了避免遮挡,某一层的节点空间受到上下两层三维球截面圆半径的制约.如图 11 所示,在这个约束条件下,节点空间圆直径为

$$D_{beti} = \begin{cases} \frac{1}{2}R_i, & i = 0 \\ \frac{1}{2}(|R_{i+1} - R_{i-1}|), & i > 1 \end{cases} \quad (10)$$

其中,  $R_i$  为节点映射到球面后所在截面圆的半径.

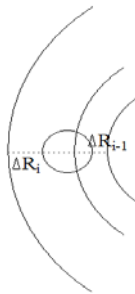


Fig.11 Space constraints between levels

图 11 层间空间制约

(2) 在进行空间分配时还要考虑同层之间节点的空间分配问题.假设父节点位于第  $i$  层,子节点的个数为  $NumOfChildren$ ,子节点空间圆直径为

$$D_{inLevi} = 2R_{i+1} \sin\left(\frac{Leftlimit - Rightlimit}{2NumOfChildren}\right) \quad (11)$$

则子节点空间圆半径为

$$D_i = \min(D_{beti}, D_{inLevi}) \quad (12)$$

节点的数据细节在这个圆柱空间内进行展示,如图 12 所示.在实际应用中,较深层次的节点已经处于用户关注的边缘,其展示空间随层次的加深迅速减小,如图 13 所示,可以退化为采用简单的几何形体来代表这些节点,以降低视图的复杂度,提供用户更加清晰的展示效果.本文算法实现中,对第 5 层及更深层次的节点进行了这种退化处理.

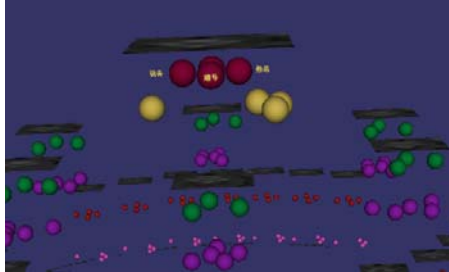


Fig.12 Display of data details

图 12 数据细节展示

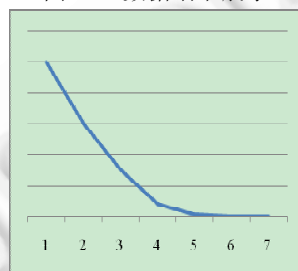


Fig.13 Display space varies with the level changes

图 13 展示空间随层次变化示意图

### 3.3 交互分析

根据 Shneiderman<sup>[16]</sup>对交互任务的总结和分类,并结合应用实例本身,系统提供了 4 种交互行为.

- 视图概览.复球面放射树本身是一种 Focus+Context 的可视化技术,因此,可以很好地提供节点的全局概览视图.在应用中,焦点位于球面的顶点处,且具有最大的展示空间呈现细节信息.可视形态是一种严格的层次结构,可以很好地反映数据的层次性.深层次作为用户关注的边缘,被布局在球面的底部,作为交互分析的上下文语境.

- 视图移动变换.三维空间可以很好地支持视角的变换以及模型的缩放.旋转是通过鼠标的拖动来实现的,用户通过旋转可以从不同侧面对数据内容进行分析.

- 焦点变换.球极映射是一个双射,当焦点发生变换时,首先在二维平面对节点按照改进的放射树布局算法重新进行布局,然后采用公式(7)对新的布局进行映射,并根据新的布局,对节点的展示空间重新进行分配.为了实现一种动画效果,我们在二维平面进行变换时,采用文献[17]中的方法,对变换过程分步进行.

- 节点细节信息查询.按照节点所处的层次,分配给节点对应的三维展示空间以展示这些细节信息,用户可以通过旋转、移动等操作来查询这些细节信息.采用简单空间点来代表这些细节信息;当对这些细节信息进行点击查询时,通过表单项来进行展示.

## 4 应用实例

随着医疗机构信息化建设的不断发展,大型数字化医疗设备,如 MRI、CT 等的普及应用,医疗影像的存储规模越来越大.这些医疗影像数据包含了重要的医疗经验知识,对相同病例的诊疗具有很大的参考价值.我们将三

维球放射树可视化算法应用于海量的医疗影像,并开发了原型系统,如图 14 所示。

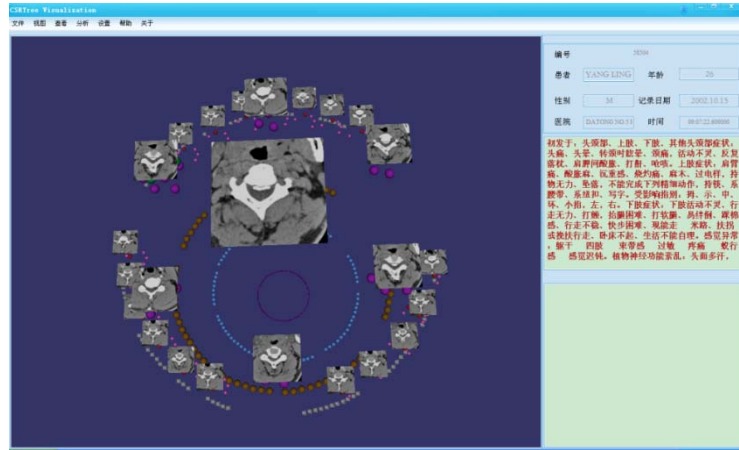


Fig.14 Application example

图 14 应用实例

图 14 展示了国内某大型医院颈椎 CT 病例影像集,共 1 738 幅影像.首先对数据集进行预处理,计算相似度,并采用相似度伸展树进行组织;然后采用本文的方法进行可视呈现,并提供用户焦点变换、细节查询、概览和旋转缩放等交互功能。

为了对本文方法进行评估,我们将 CSRTree 与文献[11,12]中两种最典型的球面可视技术以及传统的 Windows 资源树进行了实验比较,因为通过这种方式进行浏览仍然是用户使用较多的方法<sup>[18]</sup>.我们邀请了国内某家医院的 15 位医疗科研人员作为应用我们的可视化系统的被试者.实验过程设计如下:面向医疗实践的决策过程,给定一副患者的影像,要求被试者从现有的影像资料中找出类似病例,并根据这些类似病例对病情和诊疗方法给出初步决策建议;共进行 5 组这样的实验,然后统计 4 种方式下的平均任务完成时间,结果如图 15 所示.之后,针对每位实验者进行问卷调查,在易用性、有效性、可靠性这 3 个方面进行评分,分数范围为 1 分~6 分.易用性体现实例中所设计的操作工具的易用程度;有效性体现了用户通过应用实例观察到可视信息的效率;可靠性反映了可视化工具展示结果对于决策过程支持的可信程度.结果如图 16 所示。

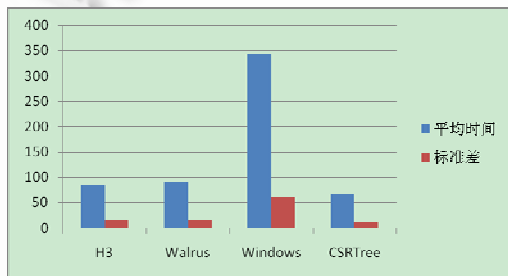


Fig.15 Comparison of completion time

图 15 任务完成时间对比

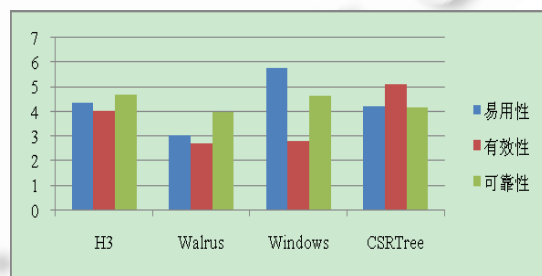


Fig.16 User evaluation

图 16 用户评估结果

## 5 结论和展望

目前,大型层次结构化信息可视化技术已经取得许多研究成果,但是这些已有的可视化技术并不能满足大规模层次非结构化信息的应用.本文通过调研相关工作,对二维放射树布局算法进行了改进,并基于球极映射实现一种复球面放射树(complex sphere radial tree,简称 CSRTree)可视化技术以进行海量层次非结构化信息的可视化.该技术可以在有限的空间内展示海量信息,并实现一种 Focus+Context 的展示效果,在突出局部焦点信息

的同时,兼顾了海量层次信息的整体视图.基于上述算法开发了原型系统,并针对海量的医疗影像数据进行用户实验,实验结果表明:在固定的显示空间内,系统既可以显示海量的层次信息的局部细节,又兼顾了信息整体语境,具有较高的交互效率和用户满意度.

未来的工作是研究减少球面放射树中处理节点之间的交叉连线以及实现多重球嵌套等相关技术,进一步解决多重层次结构可视化中的交互问题.

#### References:

- [1] Lamping J, Rao R, Pirolli P. A focus+context technique based on hyperbolic geometry for visualizing large hierarchies. In: Proc. of the SIGCHI Conf. on Human Factors in Computing Systems. Denver: ACM Press/Addison-Wesley Publishing Co., 1995. 401–408.
- [2] Book G, Keshary N. Radial tree graph drawing algorithm for representing large hierarchies. University of Connecticut, 2001.
- [3] Wang W, Wang H, Dai G, Wang H. Visualization of large hierarchical data by circle packing. In: Proc. of the SIGCHI Conf. on Human Factors in Computing Systems. Montréal: ACM, 2006. 517–520.
- [4] Stasko J, Zhang E. Focus+Context display and navigation techniques for enhancing radial, space-filling hierarchy visualizations. In: Proc. of the IEEE Symp. on Information Visualization. 2000. 57–65.
- [5] Robertson GG, Card SK, Mackinlay JD. Information visualization using 3D interactive animation. Commun. of the ACM, 1993, 36(4):57–71.
- [6] Munzner T. H3: Laying out large directed graphs in 3D hyperbolic space. In: Proc. of the IEEE Symp. on Information Visualization. 1997. 2–10.
- [7] Foley HHTA, Nielson GM. Visualizing and modeling unstructured data. The Visual Computer, 1993,9(8):439.
- [8] Card SK, Nation D. Degree-of-Interest trees: A component of an attention-reactive user interface. In: Proc. of the Working Conf. on Advanced Visual Interfaces. Trento: ACM, 2002. 231–245.
- [9] Ren L, Wang WX, Teng DX, Ma CX, Dai GZ, Wang HA. Focus+Context technique for interactive visualization of large hierarchies. Journal of Software, 2008,19(11):3073–3082 (in Chinese with English abstract). <http://www.jos.org.cn/1000-9825/20081128.htm> [doi: 10.3724/SP.J.1001.2008.03073]
- [10] Chen L. 3D information visualization interaction technique and application on network security [MS. Thesis]. Tianjin: Tianjin University, 2008 (in Chinese with English abstract).
- [11] Munzner T, Burchard P. Visualizing the structure of the World Wide Web in 3D hyperbolic space. In: Proc. of the 1st Symp. on Virtual Reality Modeling Language. San Diego: ACM, 1995. 33–38.
- [12] Krioukov D, Papadopoulos F, Kitsak M, Vahdat A, Boguö M. Hyperbolic geometry of complex networks. Physical Review E, 2010, 82(3):36–45.
- [13] Kreuseler M, Schumann H. Information visualization using a new focus+context technique in combination with dynamic clustering of information space. In: Proc. of the 1999 Workshop on New Paradigms in Information Visualization and Manipulation in Conjunction with the 8th ACM International Conf. on Information and Knowledge Management. Kansas City: ACM, 1999. 1–5.
- [14] Amato G, Mainetto G, Savino P. An approach to a content-based retrieval of multimedia data. Multimed Tools Appl., 1998,7: 9–36.
- [15] Brown JW, Churchill RV. Complex variables and Applications. 8th ed., Boston: McGraw-Hill Higher Education, 2009. 468.
- [16] Shneiderman B. The eyes have it: A task by data type taxonomy for information visualizations. In: Proc. of the IEEE Symp. on Visual Languages. 1996. 336–343.
- [17] Yee K-P, Fisher D, Dhamija R, Hearst M. Animated exploration of dynamic graphs with radial layout. In: Proc. of the IEEE Symp. on Information Visualization 2001 (INFOVIS 2001). IEEE Computer Society, 2001. 43.
- [18] Blanc-Brude T, Scapin DL. What do people recall about their documents: Implications for desktop search tools. In: Proc. of the 12th Int'l Conf. on Intelligent User Interfaces. Honolulu: ACM, 2007. 102–111.

#### 附中文参考文献:

- [9] 任磊,王威信,滕东兴,马翠霞,戴国忠,王宏安.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. <http://www.jos.org.cn/1000-9825/20081128.htm> [doi: 10.3724/SP.J.1001.2008.03073]

[10] 陈磊.三维信息可视化交互技术及其在网络安全中的应用[硕士学位论文].天津:天津大学,2008.



滕东兴(1973-),男,山东青岛人,博士,副研究员,CCF 高级会员,主要研究领域为信息可视化技术,可视分析技术,海量数据管理技术.



马翠霞(1975-),女,博士,副研究员,CCF 高级会员,主要研究领域为人机交互技术,草图用户界面.



闫奎名(1986-),男,硕士生,CCF 学生会会员,主要研究领域为人机交互技术,可视分析技术.



戴国忠(1944-),男,研究员,博士生导师,CCF 高级会员,主要研究领域为人机交互,计算机图形学.



樊银亭(1975-),男,博士生,CCF 会员,主要研究领域为人机交互技术,自适应用户界面.



王宏安(1963-),男,博士,研究员,博士生导师,CCF 高级会员,主要研究领域为实时智能,用户界面.

www.jos.org.cn