

中图法分类号: TP391 文献标志码: A 文章编号: 1006-8961(2011)07-1326-09

论文索引信息: 王琦, 鲁东明. 知识发现在古代壁画展示中的应用[J]. 中国图象图形学报, 2011, 16(7): 1326-1334

知识发现在古代壁画展示中的应用

王琦, 鲁东明

(浙江大学计算机科学与技术学院, 杭州 310027)

摘要: 将面向属性的归纳方法(attribute-oriented induction)用于壁画的展示, 提出一种基于知识发现的壁画展示方法。对壁画按内容、位置、时间等强相关维属性, 引入本体的层次化描述方式用于对比展示, 可帮助研究者更好地获取对象的隐性知识, 启发新的类描述和关联规则的发现。结合基于绘画构图学特征的相关度评价方法, 可有效地选取研究者关注的内容进行比较和展示。实验以真实的敦煌壁画研究课题为例, 验证了本文方法在辅助壁画研究中的有效性。

关键词: 本体扩展检索; 面向属性的归纳; 构图; 相关度; 相关维; 古代壁画

Application of knowledge discovery in ancient mural exhibition

Wang Qi, Lu Dongming

(College of Computer Science and Technology, Zhejiang University, Hangzhou 310027 China)

Abstract: By introducing attribute-oriented induction methodology (AOI) of data mining, this paper puts forward a new exhibition method for murals based on knowledge discovery. Retrieval results are organized according to the correlation dimension of murals for presentation of comparison, which is helpful for the researchers to acquire implicit knowledge and enlighten new association rules. We present a composition-based relevance ranking to display result images. The applications in Dunhuang mural demonstrate the effectiveness of our approach.

Keywords: ontology based query expansion; attribute-oriented induction; composition; relevance; correlation dimension; ancient murals

0 引言

中国古代壁画包括敦煌壁画、新疆克孜尔壁画、甘肃永靖炳灵寺壁画、甘肃麦积山石窟壁画等大型石窟壁画, 为宗教、历史、地理、艺术、风俗、服饰等领域研究提供了丰富的图像资料。在庞大的壁画资料库中, 如何提取到真正符合研究者需要的壁画内容, 并进而采用有效的方法对壁画内容进行展示, 以凸显其中蕴含的有关造型、风格、笔法等难以用计算

机准确描述的隐性知识, 启发研究者发现其中潜在的关联, 这些都是壁画资料检索和展示中亟待解决的问题。目前, 在博物馆艺术品的展示方面, 面对大量展品内容, 如何避免参观者“信息过载”, 引导一种有针对性的参观, 已有研究者对展示和推荐技术进行了研究^[1-2]。但这些研究不能很好地用于古代壁画的展示。古代壁画的检索和展示面临如下的挑战:

1) 多维相关性的展示。与普通图像相比, 敦煌学的研究表明, 壁画内容演变与壁画的地域、位置以及朝代之间存在着较强的相关性(图1)。

收稿日期: 2010-07-19; 修回日期: 2010-12-13

基金项目: 国家教育部长江学者和创新团队发展计划基金项目(IRT0652); 教育科研基础设施 IPv6 技术升级和应用示范项目; 古代壁画保护国家文物局重点科研基地开放基金项目; 新世纪优秀人才支持计划基金项目(NCET-04-0535)。

第一作者简介: 王琦(1974—), 男, 教授级高级工程师。浙江大学计算机科学与技术专业博士研究生, 主要研究领域为数字化文物与艺术等。E-mail: wangchee99@yahoo.com。

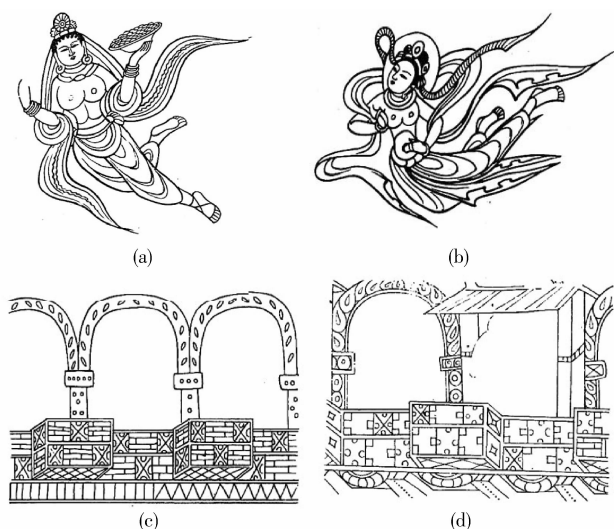


图1 壁画内容与地域位置、时间的相关性

Fig.1 Illustration of correlation between content and geographic location, content and dynasty

(1) 内容演变与地域的相关性 西域新疆克孜尔壁画(图1(a))中丰乳、细腰、大臀的裸体飞天出现在生活习俗不同、儒家思想根深蒂固的敦煌壁画(图1(b)),壁画从技法到形象上都显示出敦煌乡土色彩^[3]。

(2) 内容演变与朝代的相关性 北朝第1期壁画中圆券形的天宫(图1(c))到了第2期(图1(d))出现了圆券形和中原汉式方形相间的建筑式样^[4]。

需要一种能够揭示壁画中蕴含的显性和隐性知识之间的关联的展示方式,触发研究者的灵感。

2) 同名内容元素相关度的计算。与普通图像相比,古代壁画图像相对较大,构成复杂。需要可以区分同名对象内容与所表达概念间相关度大小的评价机制,选取那些最符合研究者实际检索意图的壁画内容,提高检索的准确性。

针对上述挑战,我们对敦煌壁画研究工作的方法和过程进行了深入分析,提出了一种基于知识发现的古代壁画展示技术。主要是:

1) 多相关维的壁画对比展示技术。在本体语义标注和语义扩展检索的基础上,将数据挖掘领域面向属性的归纳方法(attribute-oriented induction)^[5]用于古代壁画的研究中,对壁画按内容、位置、时间等强相关维属性构造数据立方体用于交互式对比展示和区分分析。引入本体层次用于相关维的同步概化(Generalization),通过动态调整展示内容的颗粒度以及相关维属性的概化层次,可以凸显对象蕴含

的隐性知识,启发研究者对目标类和对比类之间类区分规则的描述,揭示新的关联。

2) 基于构图和语义的相关度度量方法。提出了一种基于绘画构图特征的内容相关度评价方法,解决同名内容元素的相关度计算问题。通过综合了语义和构图特征的相关度度量,用于对形成的目标类和对比类的结果进行排序和选取,提高了检索结果的针对性。

1 相关研究

应用本体工程可以为图像中蕴含的各领域属性建立关联,丰富图像的检索和展示。一些研究通过建立作品类型、风格、文化以及作者等领域本体,实现了对艺术品基于领域本体的语义检索^[6-7]。Jiang等人^[8-9]针对中国画作品建立了描述作品的“工笔画”、“写意画”等所属画种以及色调、风格的高层语义,初步实现了对绘画图像的多角度高层语义的检索。Liu等人^[10]通过引入外观设计知识本体和相关度算法,为设计者提供与设计对象相关的参考案例。采用基于本体的知识组织管理方式,更符合人类的认知习惯,可有效地消除“语义鸿沟”问题,为用户展示更多符合检索者真实意图的图像资料。

围绕用户提出的主题,为实现从多个领域视角提供丰富的相关图像资料,目前主要采用基于本体的扩展检索技术^[11]。相关度计算作为扩展检索的核心,主要采用语义相似度的计算^[12]。Natsev等人^[13]将文本的和视觉特征的相关度相结合,对多媒体的扩展检索进行了有益的尝试。Zhang^[14]通过将对象的文本和非结构化的声音、图像特征间进行相关性分析,提高了检索的性能。

除了扩展检索,在提高展示内容的针对性方面,还有的通过跟踪用户的行为和操作,建立了个性化的用户兴趣本体,提高了系统对用户的语义及兴趣的理解程度^[1]。Wang等人^[2]在博物馆藏品展示中,通过问卷方式来建立用户的个性化 Profile 模型,从而实现博物馆藏品的个性化推荐。

上述研究按照用户意图,提供语义上相似、图像底层特征上相关的结果,以更好地领会用户的真实意图具有重要的实用价值。但是,对于古代壁画这类具有复杂的内在结构和丰富内容语义的图像而言,现有的研究成果还无法胜任古代壁画的检索和展示要求。

2 基于知识管理的壁画展示方法

2.1 古代壁画研究的方法和目的

演变史的研究是古代壁画研究工作的基础,主要的研究步骤包括:1)确定研究主题;2)收集相关壁画资料;3)按照位置和时间对壁画资料的内容构成、造型、风格等特征进行分类和归纳;4)分析演变成因。

本文提出的古代壁画展示系统实现了对上述2)、3)两个阶段工作的支持,可起到提高资料收集效率和质量,启发和揭示壁画知识间新的关联关系的作用。

2.2 基于知识管理的展示方法架构

本文工作的核心思想是运用数据挖掘的分析方法,将壁画视为一个事物,它的图像特征属性与地理位置、窟内位置等空间属性以及时代等时间属性之间存在大量未知的关联,其中很多属性难以用现在的计算机技术处理和表达。通过基于类区分(Data Discrimination)的交互式对比展示方式,对计算机能够区分和计算的属性进行比较展示,以突出壁画目标类和对比类之间诸如造型、风格等计算机难以描述的可区分特性和属性间的关联,启发研究者关于

这些特性的区分规则的总结和新关联规则的发现。

本文方法的框图如图2所示,大致可以分为4个阶段:1)知识的表示阶段是基础,包括设计专门用于古代壁画研究的本体,依据本体对壁画元素进行标注实现知识库的构建。2)扩展检索阶段。研究者需要收集的壁画资料可以描述为 $Q = \{q_1, q_2, \dots, q_i, \dots, q_n\}$ 以及空间关系 $\langle q_m, q_n, O \rangle$ 。其中, $\{q_1, q_2, \dots, q_i, \dots, q_n\}$ 是壁画需要包含的内容元素,用多个概念表示, O 是内容元素间的相对方位和拓扑关系,也就是壁画内容的布局。首先,根据壁画本体对研究者输入的检索条件作语义扩展,扩展后的查询内容 Q' 将从概念所在知识结构的深度和覆盖领域的广度两个方面都得到一定的扩充。接着,根据检索的内容要素和布局特征从壁画中提取局部画面作为结果。3)结果的选取阶段。在壁画扩展检索结果的基础上,通过引入基于壁画特征的相关度算法,选出那些最符合真实检索意图的相关结果。4)对比展示阶段。将本体知识和面向属性的归纳方法相结合,研究者通过在已知的内容元素名称、时间以及位置等强相关维属性中选择需要关注的属性,并根据本体层次关系确定同步概化的层次,籍此产生研究者期望的一个目标类和多组对比类的壁画资料。

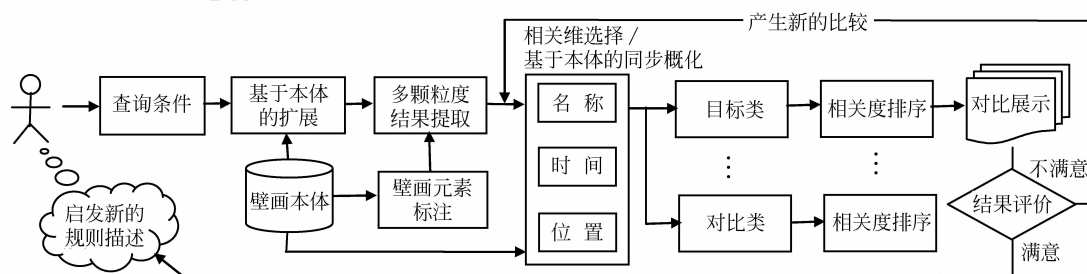


图2 基于知识发现的壁画展示流程

Fig. 2 Method overview

3 古代壁画知识的表示

知识的表示,知识库的构建是基于知识管理的古代壁画展示的基础。古代壁画的知识大致可以分为内容、时间和位置3个维度的属性。其中,内容又可细分为壁画元素的名称、主题、所属画种、造型、构图、风格等属性。时间则是指壁画绘制的年代,时间的颗粒度从明确的朝代纪年到壁画的总体分期。位

置包括壁画的窟内位置,如东壁、西坡、窟顶等,还包括壁画所在石窟的位置,如窟号等,以及石窟群所在的地理位置,如敦煌、龟兹地区等,这些表示时间、位置颗粒度的知识概念也存在层次型的关系。我们建立的“佛教人物”、“时间”和“位置”等属性本体概念间存在IS-A和Member-of两种关系,如图3所示。

对古代壁画的统计研究表明,壁画的内容—内容、内容—时间、内容—位置之间存在着很强的相关性。以主题内容为法华经的壁画为例,莫高窟共有

44 窟包含法华经内容,其中内容为表现释迦牟尼佛和多宝佛并坐的就占了 32 窟。表明两佛并坐内容与法华经内容的象征之间存在较强的相关性。关于内容—时间的相关性,统计表明法华经壁画始于隋代,盛于唐,绝迹于元代。至于内容—位置的相关性,隋代法华经壁画的位置全部都在窟的坡上^[15]。我们通过将内容维中目前计算机能够处理的元素名称、主题、画种等属性结合时间和位置维度,将壁画的目标类和对比类进行对比展示。研究者可以通过

选择不同的相关维属性,结合本体调整同步概化的层次,以启发研究者对壁画中风格、造型等隐性知识的归纳和区分,以及新关联规则的发现。在图 3 所示整个以内容、时间和位置为维度的 3 维空间中,用于对比研究的目标类 X 和对比类 Y 可视作在各个维度上有一定跨度的数据立方体(图中的深色立方体)。由于本体语义扩展的引入,立方体的内容维表现为以初始检索语义为中心的一个范围(图中的浅色长方体)。

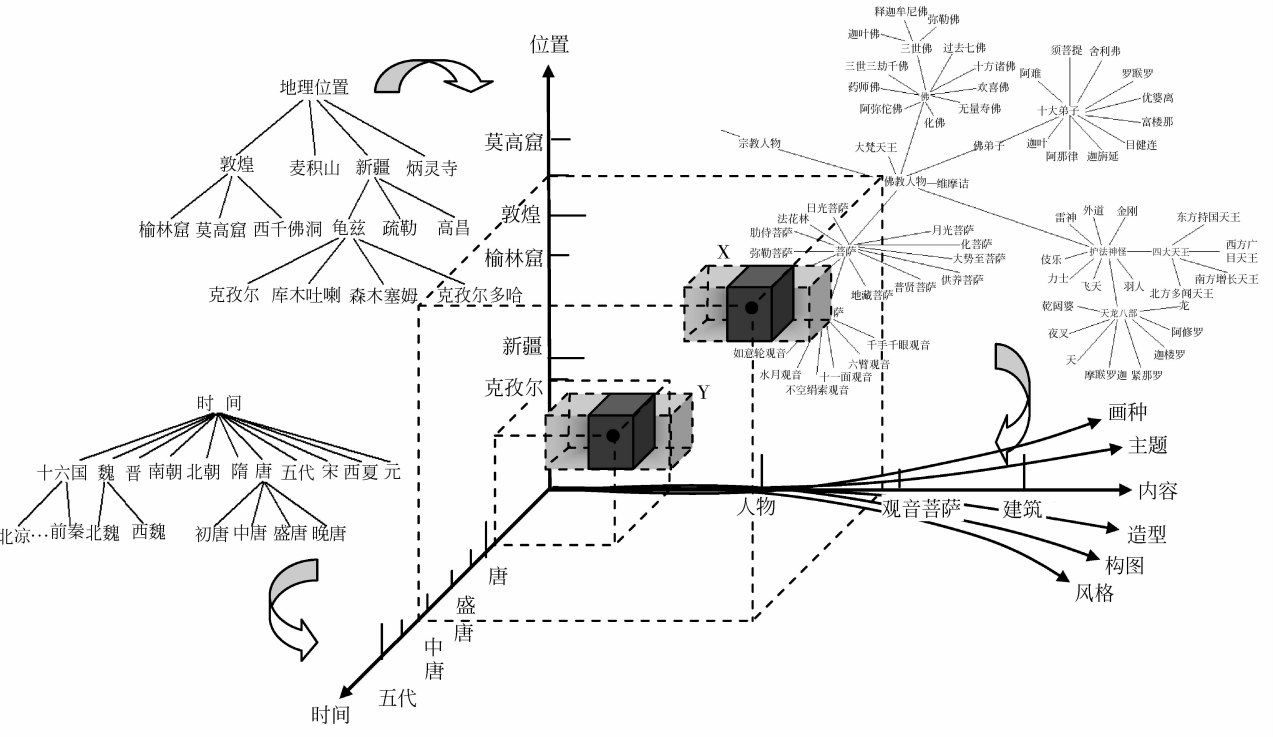


图 3 基于相关维知识的壁画资料对比展示

Fig. 3 Presentation of comparison in a three-dimensional space

4 结果的相关度计算

为提高检索结果的质量,需要根据检索语义对结果进行排序和筛选后再作对比展示。本文在对壁画的绘画构图学特征研究基础上,提出了一种综合语义和视觉构图结构的相关度计算方法。算法由内容语义的相关度和构图布局的相关度两方面因素组成。

1)在概念的语义相似度 LCH 算法^[16]基础上,提出了内容语义相关度的计算方法,用于评价本体扩展检索词的引入对结果准确率的影响。LCH 算法是一种基于概念节点间路径长度的相似度度量方

法,反映了本体中概念间 IS-A 关系的相似程度。该算法不需要计算概念的信息量,但具有和基于信息量的相似度算法相近的准确度。内容语义相关度计算与 LCH 算法的主要区别在于我们需要计算的是用语义扩展后的概念进行检索,得到的检索结果与初始检索概念间的语义相关程度。从这个角度来看,扩展检索引入的初始检索词的下位词(Hyponym)或成员词(Meronym) c_i ,虽然按照 LCH 算法这些词在语义上会与初始检索词 q 有一定的差异,但由于 c_i 是对原有概念 q 的特化(Specialization),是 IS-A 或 Member-of 的关系,这些扩展概念的引入不会降低检索结果的准确率。如地理概念“克孜尔”是“龟兹”的成员词,在检索标注为“龟兹”地区的壁画时,地

理位置为“克孜尔”的扩展检索结果也是期望的检索结果。基于此,将初始检索概念与其下位词或成员词间的内容语义相关度置为 1,得到内容相关度为

$$S_i = \begin{cases} 1 & c_i \text{ 为 } q \text{ 的下位词或} \\ & \text{成员词} \\ -\log \frac{\text{len}(q, c_i)}{2D} & \text{其他} \end{cases} \quad (1)$$

式中, S_i 表示引入扩展检索概念 c_i 得到的检索结果与初始检索词概念 $q \in Q$ 的语义相关程度。 $\text{len}(q, c_i)$ 是从概念节点 q 到 c_i 的最短路径, D 是本体树的深度。

2) 提出一种基于图像构图结构的相关度计算方法。根据绘画构图学的理论,画面内容元素的重要程度是与构图布局相关的。即使是同名的内容元素,由于构图布局上的主次不同,这些元素对于表达某个概念所起的作用大小也是不同的,这一特性我们称之为构图相关度。在本文研究中,仅考虑位置和比例两个因素。

关于画面元素的位置布局因素,根据构图学理论,内容元素的构图相关度随着元素在画面中的位置靠近构图学的视觉中心而升高。

为能对构图的位置相关度进行量化地度量,根据《中国石窟——敦煌莫高窟》^[17] 所载的图版,通过对壁画中标注对象的统计,得到壁画中重要对象的分布数据。在此基础上,采用 3 个分量的高斯混合模型(GMM)来描述古代壁画构图的位置相关度分布函数 L ,据此可对古代壁画构图的位置相关度作量化分析。

$$L = \sum_i \pi_i N(\mu_i, \Sigma_i) \quad (2)$$

式中,参数 π_i, μ_i, Σ_i 可由 EM (expectation maximization) 算法估算得到。

关于画面元素的比例因素,根据构图学理论可知画面元素的构图相关度与内容元素在画面中所占的比例成正比。且同一画面的同类内容元素中比例越大的构图相关度越高。

把用最小包围盒(MBR)形式标注的内容元素 i 的面积记为 A_i ,壁画的面积为 A ,内容元素的比例值即为 A_i/A 。但是,由于不同类别的内容元素具有不同的比例范围。例如建筑占画面的比例通常要比人物的大,这将导致元素间比例值的不可比性。采用按元素所属类别归一化的方法来解决此问题。首先根据本体的 IS-A 关系将元素进行归类,记元素所属

的类为 C ,该类比例值的最大和最小值分别记为 $C_{\max}$ 和 $C_{\min}$ 。将内容元素的比例值按照它们所属的类进行归一化,得到关于比例因素的相关度

$$R_i = ((A_i/A) - C_{\min}) / (C_{\max} - C_{\min}) \quad (3)$$

这样,基于构图的相关度 K_i 是由内容元素 i 的位置和比例两方面因素所确定,单个内容元素的构图相关度为

$$K_i = L_i \cdot R_i \quad (4)$$

综合内容相关度和构图相关度,单个内容元素检索的相关度为

$$P_i = S_i \cdot K_i \quad (5)$$

对于包含多个元素的局部场景检索,记局部场景的最小包围盒面积为 M ,引入式(6)所示的结果紧致率 ρ 来衡量作为结果的局部画面的紧凑程度, ρ 与结果范围占画面的大小成反比关系。

$$\rho = A/M \quad (6)$$

一个包含多个内容元素的局部画面,一方面来说包含的相关内容元素越多,结果的相关度越高;另一方面,随着结果画面范围的扩大,内容元素间关系就越松散,结果的相关度就越低。综合内容相关度和构图相关度,局部场景检索的相关度为

$$P = \rho \sum_{i \in Q'} P_i \quad (7)$$

式中, i 是属于扩展检索 Q' 的相关内容元素。

5 应用实例与分析

用 Java 实现了基于图 2 所示架构的壁画展示系统。以敦煌石窟研究框架性文献[18]等为基础,完成了壁画本体的设计,使用 Protégé 建模,采用 JUNG(Java universal network/graph framework)软件包实现了本体层次结构的概念扩展和相似度计算。在开源的语义标注工具 PhotoStuff 基础上,实现了古代壁画专用的标注工具 DSAT(Dunhuang semantic annotation tool),可以直接根据 Protégé 创建的 RDF 格式本体进行标注。图 4 是用标注工具 DSAT 进行壁画标注的界面。以权威出版物《中国石窟——敦煌莫高窟》^[17] 的图版说明为依据完成了 120 幅壁画,共计 1 932 个内容元素的标注和知识库的构建。图 5(a)是古代壁画展示系统在对初唐和中、晚唐时期的文殊菩萨作对比展示的界面,壁画中的文殊菩萨及其特化概念千手千钵文殊等按照相关度排序后进行对比展示,同时显示了壁画的位置、主题、朝代

等其他相关维度的信息,可供研究者选择以作进一步的比照分析。用户点击结果图像,系统将展示结果所在的壁画全图(图 5(b))。其中,黑色框标示的是检索的结果内容,灰色为壁画的其他内容元素。移动鼠标至各标注对象上,可动态显示对象名称,以便研究者结合研究对象的上下文进行分析。



图 4 敦煌壁画语义标注工具界面

Fig. 4 The user interface of our annotation tool DSAT



(a) 古代壁画展示系统界面



(b) 检索结果所在壁画全图的展示

图 5 古代壁画展示系统示例

Fig. 5 Graphic user interface of the proposed system

应用案例 1 结合关于法华经的研究课题^[19]来演示本文方法的有效性。该研究课题以壁画中表现《法华经·见宝塔品》的释迦、多宝两佛并坐讲法图像为研究主题,对北朝—隋代图像中的坐姿,宝座形制,肋侍,场景的造型,绘画风格,窟中位置的重要程度,壁画内容与位置的关系等进行了全方位的分析研究。

用主体对象“释迦牟尼佛”、参照物“多宝佛”,相对方位关系“左”,其他元素“宝塔”来描述需要研究的场景,用于比照的时间维将结果分为北朝—隋代(A 组)与唐代(B 组)作对比展示,得到的两组 Top 6 的结果如图 6 所示。结果按照相关度进行排序,排在前几位的图像如 A 组的 No. 1—5 和 B 的 No. 1—4 和 6 在内容语义上与研究者的描述完全符合,属于内容元素为同名的结果图像。根据本文的相关度排序算法,这些结果将主要按照结果的构图相关度 C_{Rel} 和紧致率 ρ 排序。A 组的 No. 6 在内容语义上缺少了“宝塔”,因此排序靠后;B 组的 No. 5 在内容上是语义扩展检索的结果,表现的是“弥勒佛”和“菩萨”并坐的场景,其他元素也由“宝塔”变为同属建筑类的“殿堂”,属于与研究者的意图相关的展示内容。B 组 No. 6 与 No. 4 来源于同一壁画的不同区域。图 7 展示了本文方法对此类嵌套结果的区分能力。壁画中两个释迦牟尼佛分别标记为 A 和 a,多宝佛标记为 B,宝塔标记为 C。白色矩形框所示区域为 No. 4 的结果,黑色为 No. 6 的结果。在结果图像的内容语义和构图特征相近的情况下, No. 4 的结果紧致率 ρ 为 74.290 8,远大于 No. 6 的 21.094 9。结果紧致率的引入,保证了对象间空间关系紧密的 No. 4 结果具有比 No. 6 高的相关度。从作品的布局上来看, No. 6 结果中的 A 与 B 两者关系松散,确非符合用户要求的检索意图。

通过对比展示,还可以揭示特定主题壁画的盛衰演变信息。由式(5)(7)可知,结果的相关度由内容语义和画面构图布局两方面组成。对于具有类似内容元素的结果画面,布局的重要程度 C_{Rel} 决定了结果的相关度,因此,可以通过观察这些结果的相关度来了解它们在窟中所处的重要程度高低。如 A 组的 No. 3 位于隋代结果中最前面的位置,说明其在所处的 303 窟中位于比较重要的位置。而具有同样类似内容构成的 No. 5 则排序较后,说明已处于相对较为次要的地位。Zhang 的研究证实了这一现象^[19]。

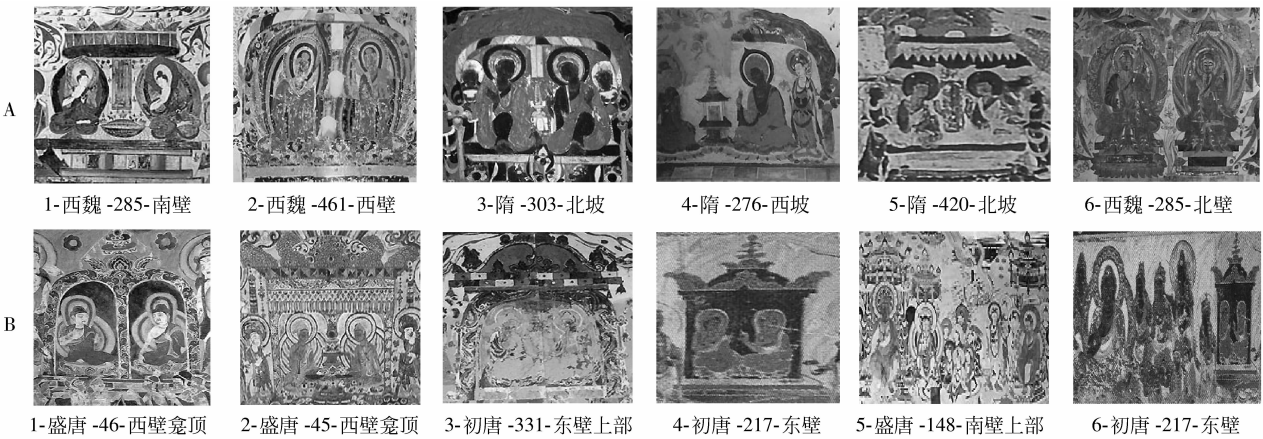


图 6 应用案例 1 的结果展示
Fig. 6 Query results of application I

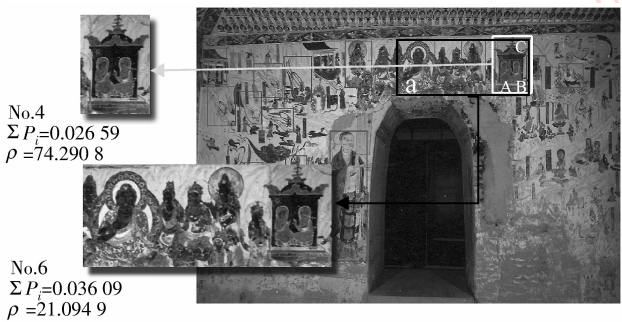


图 7 No. 4, 6 结果所在壁画的布局示意
Fig. 7 The layout of the original mural contains result No. 4 and 6

在壁画内容主题与位置的关联关系方面,通过对比展示,可以发现隋代该主题的画面全部位于窟

的顶部(坡)。通过对比展示,还可以凸显壁画与时代相关的艺术风格及造型特点。

应用案例 2 以单个壁画元素“飞天”为展示内容,用壁画所在的地域作为比较的维度,作地域位置的比较展示。其中, A 组地域概念选择新疆的“龟兹”地区, B 组为敦煌的“莫高窟”,得到的两组按相关度排序的结果如图 8 所示。由于篇幅所限,仅列出了前 Top 5 的结果。基于地理位置概念 Member-of 关系扩展的内容语义相关度 $SRel$ 算法,将属于“龟兹”地区的“克孜尔”、“克孜尔朵哈”、“库木吐喇”等地理位置的飞天壁画作为内容语义上最相关的检索结果。同时,根据相关度算法,那些在内容和构图上具有较强代表性的“飞天”优先予以展示。通过对比展示,验证了 Duan 的研究所归纳的造型

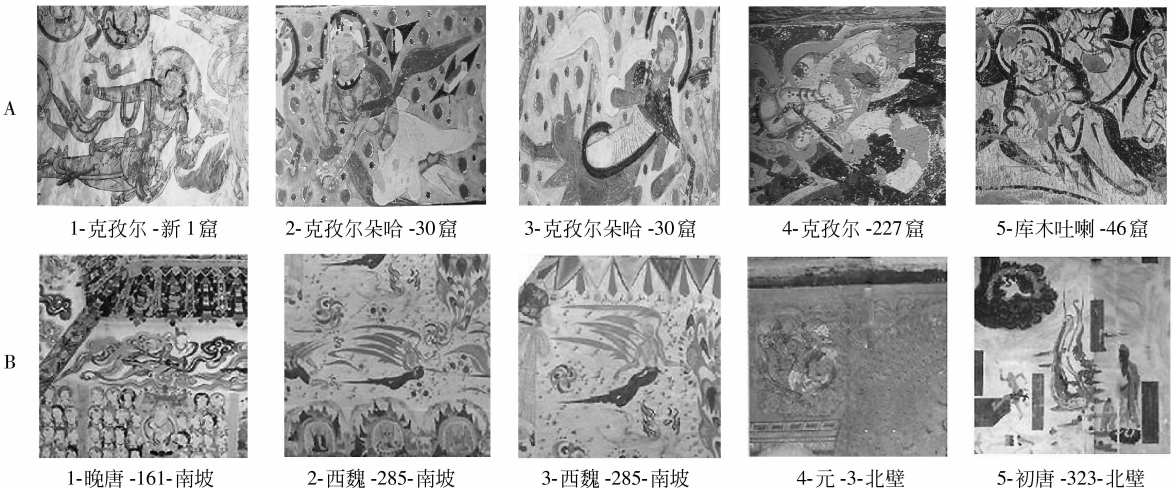


图 8 应用案例 2 的结果展示
Fig. 8 Query results of application II

特点和变迁^[3]。

通过上述应用实例验证了本文启发式壁画展示方法在辅助古代壁画工作中的有效性。另外,本文以内容元素为最小处理颗粒度的展示方法,可适应对单个内容元素到包含多个元素的场景作相关度度量 and 结果的展示。将结果与其所在的壁画全貌相结合,进行基于内容元素上下文的交互展示,这对于研究古代壁画这样大型的、具有复杂构成的图像来说,是十分有效的。

6 结 论

在本体语义标注和扩展检索基础上,提出一种基于知识发现的古代壁画展示方法。我们借鉴了数据挖掘的方法,对壁画检索结果按强相关维属性构造数据立方体用于对比展示,供研究者作区分分析。引入本体层次用于相关维的同步概化,可以方便研究者以日常习惯的语义方式来设定比较的范围和颗粒度,帮助研究者进行面向属性的归纳。在对结果图像的排序和选取方面,提出了一种基于绘画构图特征的相关度评价方法,使得最符合研究者真实意图的结果可以得到优先展示。

结合敦煌壁画研究的多个应用实例表明,本文基于知识管理的古代壁画展示方法可满足研究者对壁画内容的多颗粒度语义检索和对比展示需要,启发研究者对潜在知识和规则的发现和归纳。本文方法还可应用于博物馆绘画类藏品的比较展示,古代壁画的断代辅助,以及按特定主题的个性化出版方面。

当然,本文的研究只是第一步,发现由于壁画中大量对称布局的存在,导致这些对称的结果几乎具有相同的相关度(如图8B组结果2和3就是同一壁画中的两个对称的飞天图像)。有可能导致一些有价值的内容淹没在大量类似的结果中。进一步的研究打算结合图像的底层特征,对结果作基于图像内容的聚类 and 分组,提高检索结果的质量。

参考文献 (References)

[1] Sendhilkumar S, Geetha T V. Personalized ontology for web search personalization [C]//Proceedings of the 1st Bangalore Annual Compute Conference (Compute '08). New York, NY, USA: ACM, 2008:1-7.

[2] Wang Yiwen, Stash N, Aroyo L, et al. Recommendations based on semantically enriched museum collections [J]. Web Semantics, 2008, 6(4): 283-290.

[3] Duan Wenjie. Art of Early Mogao Grottoes [M]//Chinese Grotto-Dunhuang Grotto. Beijing, China: Cultural Relic Publishing House, 1987, 1: 174-176. [段文杰. 早期的莫高窟艺术[M]//中国石窟—敦煌莫高窟(一). 北京:文物出版社, 1987, 1: 174-176.]

[4] Fan Jinshi, Ma Shichang, Guan Youhui. Periodization of Mogao Grottoes in Northern dynasties [M]// Chinese Grotto-Dunhuang Grotto. Beijing, China: Cultural Relic Publishing House, 1987, 1: 177-181. [樊锦诗,马世长,关友慧. 敦煌莫高窟北朝洞窟的分期[M]//中国石窟—敦煌莫高窟(一). 北京:文物出版社,1987, 1: 177-181.]

[5] Han Jiawei, Kanmber M. Data Mining: Concepts and Techniques [M]. 2nd ed. San Francisco, CA, USA: Morgan-Kaufmann, 2006:198-218.

[6] Smeulders A W M, Hardman L, Schreiber G, et al. An integrated multimedia approach to cultural heritage e-documents [C] //Proceedings of the 4th Intl. Workshop on Multimedia Information Retrieval, in Conjunction with ACM Multimedia 2002. New York, NY, USA: ACM, 2002.

[7] Hollink L, Schreiber G, Wielemaker J, et al. Semantic annotation of image collections [C] //Proceedings of the KCAP'03 Workshop on Knowledge Capture and Semantic Annotation. Sanibel, Florida, USA: ACM, 2003: 41-48.

[8] Jiang Shuqiang, Huang Tiejun, Gao Wen. An ontology-based approach to retrieve digitized art images [C] //Proceedings of the Web Intelligence (IEEE/WIC/ACM WI'04). Washington, DC, USA: IEEE Computer Society, 2004: 131-137.

[9] Jiang Shuqiang, Du Jun, Huang Qingming, et al. Visual ontology construction for digitized art image retrieval [J]. Journal of Computing Science and Technology, 2005, 20(6): 855-860.

[10] Liu Zheng, Sun Shouqian. A knowledge management system for product form design [J]. Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics, 2009, 21(3): 376-381. [刘征,孙守迁. 面向产品外观设计的知识管理系统[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2009, 21(3): 376-381.]

[11] Liu Baisong, Gao Ji, Li Fei. Ontology based query expansion in knowledge management [J]. Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics, 2006, 18(4): 556-562. [刘柏嵩,高济,李飞. 知识管理中基于本体的扩展检索方法[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2006, 18(4): 556-562.]

[12] Richardson R, Smeaton A. Using WordNet in a knowledge-based approach to information retrieval [R]. Technical Report CA-0395, Dublin, Ireland: Dublin City University, 1995.

[13] Natsev A, Haubold A, Tešić J, et al. Semantic concept-based query expansion and re-ranking for multimedia retrieval [C]//Proceedings of the 15th International Conference on Multimedia. New York, NY, USA: ACM, 2007: 25-29.

[14] Zhang Hong, Wu Fei, Zhuang Yueting, et al. Cross-media

- retrieval method based on content correlations [J]. Chinese Journal of Computers, 2008, 31(5): 820-826. [张鸿, 吴飞, 庄越挺, 等. 一种基于内容相关性的跨媒体检索方法[J]. 计算机学报, 2008, 31(5): 820-826.]
- [15] Shi Pingting, He Shizhe. An investigation of the Saddharma-Pundarika pictures in the Dunhuang Grottos [M]//Chinese Grotto-Dunhuang Grotto. Beijing, China: Cultural Relic Publishing House, 1987, 3:177-191. [施萍婷, 贺世哲. 敦煌壁画中的法华经变初探[M]//中国石窟—敦煌莫高窟(三). 北京: 文物出版社, 1987, 3:177-191.]
- [16] Leacock C, Chodorow M. Combining Local Context and WordNet Similarity for Word Sense Identification [M]//WordNet: A Lexical Reference System and its Application. London, England: MIT Press, 1998: 265-283.
- [17] Dunhuang Academy. Chinese Grotto-Dunhuang Grotto [M]. Beijing, China: Cultural Relic Publishing House, 1987. [敦煌文物研究所. 中国石窟—敦煌莫高窟[M]. 北京: 文物出版社, 1987.]
- [18] Hu Tongqing. An introduction to Dunhuang Grotto art [J]. Dunhuang Research, 1993, 36(3): 16-34. [胡同庆. 敦煌石窟艺术概述[J]. 敦煌研究, 1993, 36(3): 16-34.]
- [19] Zhang Yuanlin. Iconographical study of the two buddhas sitting together at Dunhuang, from the Northern dynasties to the Sui dynasty [J]. Dunhuang Research, 2009, 116(4): 24-32. [张元林. 敦煌北朝—隋时期洞窟中的二佛并坐图像研究[J]. 敦煌研究, 2009, 116(4): 24-32.]