

文章编号:1001-9081(2010)07-1962-05

## 视频语义相似度网络研究

周生<sup>1,2</sup>, 胡晓峰<sup>1</sup>, 罗批<sup>1</sup>, 李志强<sup>1</sup>, 刘思力<sup>3</sup>

(1. 国防大学 信息作战与指挥训练教研部, 北京 100091; 2. 解放军炮兵学院, 合肥 230031;  
3. 沈阳炮兵学院, 沈阳 110162)  
(unbend@126.com)

**摘要:**针对虚拟新闻系统中视频使用时出现的接近于复杂网络理论中的无尺度现象,从而导致整个虚拟新闻效果下降的问题,设计了一种全新的视频语义相似度网络。详细给出了视频语义的描述模型、网络构建的规则、相似度计算的方法以及建立在相似度网络基础上的视频检索算法。对视频语义相似度网络进行了实验,结果表明,视频语义相似度网络能够非常有效地解决视频使用时出现的问题。

**关键词:**虚拟新闻;无尺度;视频语义;相似度

**中图分类号:** TP319.9 **文献标志码:** A

## Research on video similarity network

ZHOU Sheng<sup>1,2</sup>, HU Xiao-feng<sup>1</sup>, LUO Pi<sup>1</sup>, LI Zhi-qiang<sup>1</sup>, LIU Si-li<sup>3</sup>

(1. Department of Information Operation and Command Training, National Defense University, Beijing 100091, China;  
2. Artillery Academy of PLA, Hefei Anhui 230031, China;  
3. Shenyang Artillery Academy, Shenyang Liaoning 110162, China)

**Abstract:** In order to solve the problem that is close to the scale-free phenomena in the complex network theory when the video appears in the virtual information system, a brand-new network of video semantic similarity was designed. The description model of video semantics, the construction rule of the network, the computation method and retrieval algorithm based on the network were given in detail. Experiments have been made on this video similarity network. The results show that it can effectively solve the problem caused by the usage of videos.

**Key words:** virtual television news; scale-free; video semantics; similarity

### 0 引言

虚拟新闻是计算机利用过去的电视新闻视频生成的表现未来事件的虚拟电视新闻<sup>[1-3]</sup>,是为战略对抗演习<sup>[4]</sup>训练构建虚拟信息环境服务的。它通过组播不同的视频片段,并配以实时合成的新闻解说,形成新的新闻视频,来反映演习中的某个事件。

为了使得虚拟新闻更加逼真,能达到以假乱真的程度,虚拟新闻系统建立在丰富的视频库基础上。在实际应用中,根据关键字在整个视频库中进行从头到尾的自动搜索<sup>[5]</sup>,当检索到满足要求的视频时,出于对虚拟新闻生成效率的考虑,便停止搜索,选择该视频片段作为候选视频在虚拟新闻系统中播出。

对多年来搜索结果的选择统计来看,尽管视频库非常丰富,由于每次都是从头到尾搜索满足要求的视频,一旦发现便放弃余下的搜索,所以导致被选中的视频总是偏向于少数,而许多符合要求的其他候选视频选择次数很少,有的甚至为0,利用率很低。若从头到尾将满足要求的视频全部检索出来,然后进行平均选择或随机选择,则又会对虚拟新闻的生成效率产生很大的影响,导致播出时新闻变成了“旧闻”。对少数视频的反复使用会带来一个非常明显的问题,使虚拟新闻的表现效果大打折扣,逼真度下降,参演训练的人员产生审美疲

劳。而这些被反复使用的视频并非不可替代,许多与其相似的视频完全能够达到相同的效果。

针对上述问题,本文提出一种构建视频相似度网络的方法,将相似的视频聚类为一个网络,计算视频之间的相似度,统计每个视频使用的频度,并在实际中通过一个阈值参数来对频度进行调整。搜索空间从整个视频库变成单个的相似度网络空间,大大提高了检索效率,同时在不影响单个虚拟新闻表现效果的前提下,增加每个视频的平均使用次数,提高整个虚拟新闻的表现效果,增强逼真度,从而构建出沉浸感更强的虚拟信息环境。

### 1 研究背景

对历年以来战略对抗演习中2721次视频的使用分布情况进行了统计,其中少数几个视频的利用率非常高,大部分视频的利用率非常低,有的甚至没有被利用,超过50次的如表1所示。超过50次的总数为1787,占总数2721的65.7%。而超过50次的视频个数为13,占视频库总数的0.0065%。

这种少数视频被反复使用的情形与复杂网络理论中的无尺度现象<sup>[6-7]</sup>非常接近,这与设计时的初衷是相违背的。借助丰富的视频库,我们希望虚拟新闻的表现效果更好,逼真度更高,给参加演习人员造成的沉浸感更强。虽然不同的视频不可能完全相同,但是许多视频所包含的语义内容却有极大

收稿日期:2010-01-27。 基金项目:国家863计划项目(2006AA01Z337);国家973计划项目(2006CB303106)。

**作者简介:**周生(1978-),男,安徽潜山人,博士研究生,主要研究方向:战争模拟、可视化表现; 胡晓峰(1957-),男,山东栖霞人,教授,博士生导师,主要研究方向:战争模拟系统与环境、军事运筹、军事信息系统工程; 罗批(1974-),男,重庆永州人,副教授,博士,主要研究方向:战争复杂性、战争模拟、遗传算法; 李志强(1973-),男,湖北仙桃人,博士,主要研究方向:战争模拟、可视化表现、基础设施建模; 刘思力(1979-),女,辽宁沈阳人,讲师,主要研究方向:自动化控制、信息系统。

的相似性,比如,外交部发言人秦刚经常出席外交部的新闻发布会,虽然每次讲话的内容不一样,但是单从视频画面本身来看(不考虑语音部分),这些视频之间的相似度比较高。如果把战略对抗演习视频库中包含的相似的视频聚集在一起,将单个视频看做网络中的一个节点,互相之间用边连接,计算相似度的大小作为边的权值,就可以构成一个带权网络。利用这个网络,在不影响单次效果的前提下,均衡每个节点的使用次数,将会提高虚拟新闻表现的逼真度,从而构建一个更加逼真的虚拟信息环境。

表1 超过50次的数据统计

视频ID	使用次数	所占比例/%	视频ID	使用次数	所占比例/%
1761	274	10.07	2467	357	13.12
1762	128	4.70	2468	90	3.31
1764	72	2.65	2489	56	2.06
1765	53	1.95	2707	93	3.42
1766	289	10.62	2764	65	2.39
1767	116	4.26	2766	138	5.07
1774	56	2.06			

## 2 语义相似度网络

### 2.1 语义描述

构建视频语义相似度网络,首先要对视频的语义进行准确的描述,必须具备能够描述视频数据内容的模型。视频数据结构复杂,内容丰富,但从内容的构成上,视频可以看做是在时间轴上进行动态演化的物体组成,物体是视频的基本组成部分<sup>[7]</sup>。

因此,本文在综合和比较其他研究者有关视频语义描述的基础上<sup>[8-13]</sup>,结合本文的研究背景,给出一种新的视频语义模型。

**定义1** 视频语义。指的是其所包含的对象(语义物体)的行为属性及其时间关系、空间位置关系和逻辑关系的描述。可以用下面一个五元组表示。

$$VideoSemantics = \{SO, AP, TR, SR, LR\}$$

其中  $SO$  (Semantic Objects) 代表语义物体;  $BP$  (Behavior Properties) 代表行为属性;  $TR$  (Temporal Relations) 代表时间关系;  $SR$  (Space Relations) 代表空间关系;  $LR$  (Logic Relations) 代表逻辑关系。 $SO, BP, TR, SR, LR$  分别描述如下。

$SO = \{Obj_1, Obj_2, Obj_3, \dots, Obj_n\}$ ,一段视频常常包含若干个语义物体。

$BP = \{ \{ \langle Obj_1, Act_1 \rangle, \langle Obj_1, Act_2 \rangle, \dots, \langle Obj_1, Act_k \rangle \}, \dots, \{ \langle Obj_n, Act_1 \rangle, \langle Obj_n, Act_2 \rangle, \dots, \langle Obj_n, Act_k \rangle \} \}$ ,行为属性与具体的语义物体有关,可能有多。

$TR = \{ \langle Obj_i, Obj_j, R_k, Act_i, Act_j \rangle, \dots \}$ ,时间关系发生在两个不同的语义物体不同的动作之间。

$SR = \{ \langle Obj_i, Obj_j, R_k, Act_i, Act_j \rangle, \dots \}$ ,与时间关系类似,空间时间关系也发生在两个不同的语义物体不同的动作之间。

$LR = \{ \langle Obj_i, Obj_j, R_k \rangle, \dots \}$ ,逻辑关系是一种静态的关系,与时间和动作无关。

根据以上的语义模型,分别对  $SO, BP, TR, SR, LR$  建立标准的字典库,在对视频进行语义标注时,就不会出现诸如“演讲”和“演说”这种标注差异问题的出现,也为后续的相似度计算奠定了基础。

根据以上语义模型,就可以得到视频的语义关系,如图1

所示。

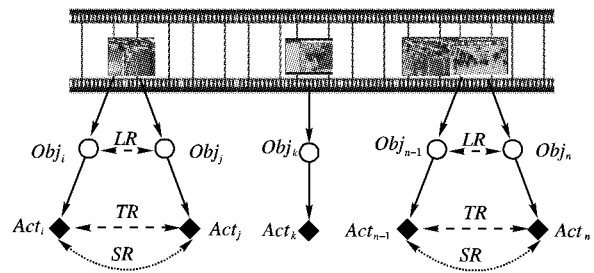


图1 视频语义关系图

对于视频的标注,采取先提取其关键帧,然后根据关键帧的语义内容进行标注,在存储标注信息时同时存储视频的每个关键帧。

### 2.2 相似度网络

在视频语义模型的基础上,构建视频语义相似度网络,如图2所示。

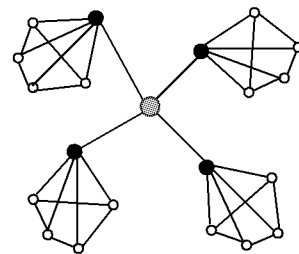


图2 视频语义相似度网络

图2中节点代表不同的视频对象;边表示连接不同的视频对象;权值为度量不同视频对象之间语义相似度的大小,相似度最大的值为1,最小的为0。

在节点中,分为灰、黑、白三种颜色,分别代表不同的含义:

灰色表示一级中心节点,某类视频的代表,并不是具体视频。

黑色表示二级中心节点,是具体的视频。选取某类视频最具代表性的作为二级节点。

白色表示实体节点,不同的视频对象,用标注中的语义模型描述;实体节点以二级中心节点为中心,形成集群;二级中心节点以一级中心节点为核心形成集群,从而形成整个网络的集群。

权值边为权值的大小代表所连接的两个视频节点相似度的大小。

### 2.3 相似度的计算

相似度的计算或相关性的度量<sup>[14]</sup>是整个视频语义相似度网络构建的核心。由于视频在标注时,同时存储了标注信息和每个关键帧,所以对于相似度的计算同时考虑标注信息和关键帧两个方面。

#### 2.3.1 标注信息相似度的计算

标注信息相似度的计算如图3所示,对标注信息中的  $SO, BP, TR, SR, LR$  分别计算。

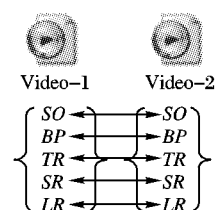


图3 标注信息相似度的计算

#### 1) 语义物体相似度的计算。

将两段视频标注信息中所有关于语义物体的元素的相似性用矩阵表示:

$$\begin{matrix} & A_1 & \cdots & A_n \\ B_1 & (a_{11} & \cdots & a_{1n}) \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ B_m & (a_{m1} & \cdots & a_{mn}) \end{matrix}$$

其中:  $A_i$  为视频1中包含的语义物体,  $n$  为语义物体数目;  $B_j$  为视频2中包含的语义物体,  $m$  为语义物体数目;  $a_{ij}$  为矩阵元素, 当  $A_i$  与  $B_j$  相同时为1, 反之为0。

整个语义物体的相似度就可以用式(1)表示:

$$S_{SO} = \left( \sum a_{ij} \right) / \max(m, n) \quad (1)$$

2) 行为属性相似度的计算。

将两段视频标注信息中所有关于行为属性元素的相似性用矩阵表示。

$$\begin{matrix} & A_1 & \cdots & A_n \\ B_1 & (a_{11} & \cdots & a_{1n}) \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ B_m & (a_{m1} & \cdots & a_{mn}) \end{matrix}$$

其中:  $A_i$  为视频1的语义物体行为属性,  $n$  为数目;  $B_j$  为视频2的语义物体行为属性,  $m$  为数目;  $a_{ij}$  为矩阵元素, 当  $A_i$  与  $B_j$  相同时为1, 反之为0。比较行为属性时, 必须与语义物体结合在一起进行比较。

行为属性的相似度就可以用式(2)表示:

$$S_{BP} = \left( \sum a_{ij} \right) / \max(m, n) \quad (2)$$

3) 时间关系相似度的计算。

将两段视频标注信息中所有关于时间关系元素的相似性用矩阵表示。

$$\begin{matrix} & A_1 & \cdots & A_n \\ B_1 & (a_{11} & \cdots & a_{1n}) \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ B_m & (a_{m1} & \cdots & a_{mn}) \end{matrix}$$

其中:  $A_i$  为视频1的语义物体之间的时间关系,  $n$  为数目;  $B_j$  为视频2的语义物体之间的时间关系,  $m$  为数目;  $a_{ij}$  为矩阵元素, 当  $A_i$  与  $B_j$  相同时为1, 反之为0。比较时间关系时, 必须与语义物体结合在一起进行比较。

时间关系的相似度就可以用式(3)表示:

$$S_{TR} = \left( \sum a_{ij} \right) / \max(m, n) \quad (3)$$

4) 空间关系相似度的计算。

将两段视频标注信息中所有关于空间关系元素的相似性用矩阵表示。

$$\begin{matrix} & A_1 & \cdots & A_n \\ B_1 & (a_{11} & \cdots & a_{1n}) \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ B_m & (a_{m1} & \cdots & a_{mn}) \end{matrix}$$

其中:  $A_i$  为视频1的语义物体之间的空间关系,  $n$  为数目;  $B_j$  为视频2的语义物体之间的空间关系,  $m$  为数目;  $a_{ij}$  为矩阵元素, 当  $A_i$  与  $B_j$  相同时为1, 反之为0。比较空间关系时, 必须与语义物体结合在一起进行比较。

关系的相似度就可以用式(4)表示:

$$S_{SR} = \left( \sum a_{ij} \right) / \max(m, n) \quad (4)$$

5) 逻辑关系相似度的计算。

将两段视频标注信息中所有关于逻辑关系元素的相似性用矩阵表示。

$$\begin{matrix} & A_1 & \cdots & A_n \\ B_1 & (a_{11} & \cdots & a_{1n}) \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ B_m & (a_{m1} & \cdots & a_{mn}) \end{matrix}$$

其中:  $A_i$  为视频1的语义物体之间的逻辑关系,  $n$  为数目;  $B_j$  为视频2的语义物体之间的逻辑关系,  $m$  为数目;  $a_{ij}$  为矩阵元素, 当  $A_i$  与  $B_j$  相同时为1, 反之为0。比较逻辑关系时, 必须与语义物体结合在一起进行比较。

逻辑关系的相似度就可以用式(5)表示:

$$S_{LR} = \left( \sum a_{ij} \right) / \max(m, n) \quad (5)$$

整个标注信息的语义相似度  $S_1$  综合考虑  $S_{SO}$ 、 $S_{BP}$ 、 $S_{TR}$ 、 $S_{SR}$ 、 $S_{LR}$ , 利用欧氏距离计算, 为了使得相似度  $S_1$  的值不超过1, 除以分母5, 如式(6)所示。

$$S_1 = \sqrt{\frac{S_{SO}^2 + S_{BP}^2 + S_{TR}^2 + S_{SR}^2 + S_{LR}^2}{5}} \quad (6)$$

### 2.3.2 关键帧相似度的计算

关键帧与关键帧之间的相似度计算, 转化成图像与图像的相似度计算。图像与图像的相似度计算方法很多, 本文采用常见的颜色直方图进行计算比较, 但不是直接将两幅图像的直方图进行比较, 而是先将视频的关键帧进行区域划分, 如图4所示。

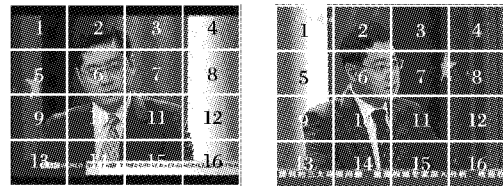


图4 两个不同关键帧之间的比较

两个关键帧分别来自 BBC 和 CCTV 拍摄的两段视频, 每个关键帧均匀划分为16个区域。对几个主要电视台的时政新闻视频进行观察发现, 几乎所有的视频关键信息都出现在图中的2、3、5、6、7、8、9、10、11、12、14、15这12个区域, 如图5所示。

1	2	3	4
5	6	7	8
9	10	11	12
13	14	15	16

图5 视频区域划分

在这12个区域中, 6、7、10、11部分包含的关键信息又比另外的8个区域多。

所以在利用颜色直方图比较两个关键帧的相似度时, 6、7、10、11四个区域记为  $R_1$ , 占总相似度的50%, 即重要度  $P_1 = 0.5$ 。2、3、5、8、9、12、14、15八个区域记为  $R_2$ , 占总相似度的40%, 即重要度  $P_2 = 0.4$ 。1、4、12、13、16四个区域记为  $R_3$ , 占总相似度的10%, 即重要度  $P_3 = 0.1$ 。每个区域的相似度用颜色直方图的比较式(7)来计算:

$$\text{Sim}(G, S) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left( 1 - \frac{|g_i - s_i|}{\max(g_i, s_i)} \right) \quad (7)$$

其中  $G, S$  为直方图,  $N$  为颜色空间样点数。

利用式(7) 根据其重要度分别对  $R_1, R_2, R_3$  三个区域计算相似度, 得到两个关键帧之间的相似度  $Sim$ :

$$Sim = P_1 \times Sim_{R1} + P_2 \times Sim_{R2} + P_3 \times Sim_{R3} \quad (8)$$

利用  $Sim$  对两个视频的关键帧按相同的顺序进行两两比较, 得到两段视频的关键帧相似度  $S_2$ 。

$$S_2 = \sum_{i=1}^{\min(n_1, n_2)} Sim_{i_i} / \max(n_1, n_2) \quad (9)$$

其中  $n_1, n_2$  分别代表两段视频的关键帧数目。

### 2.3.3 整个相似度的计算

两段视频的整个相似度大小  $S$  是根据  $S_1$  和  $S_2$  来计算的, 但绝不是对  $S_1$  和  $S_2$  求和取平均值。

再来仔细观察一下图4中的两个关键帧, 单纯从图像相似的角度来说, 图中人物的姿态、服装的颜色、背景的位置、拍摄的角度等都有很大的不同, 两幅图像的相似度其实并不大。

抛开颜色、纹理等这些底层细节特征, 来看看两幅图像所表达的语义事件。显而易见, 两者都表达了同一位发言人在进行外交阐述(这里不考虑音频部分, 因为在我们的应用中, 音频另由计算机语音合成技术实时自动再合成), 可以说非常相似。至于这位发言人的姿态、服装颜色以及其背景的位置对我们的应用的影响非常小。所以, 计算两段视频的相似度  $S$  时, 对于  $S_1$  和  $S_2$  不能同等对待, 要分别赋予不同的权重系数。经过我们的多次实验, 认为  $S_1$  的权重系统  $W_1 = 0.8$ ,  $S_2$  的权重系数  $W_2 = 0.2$  较为合适, 因此根据两者的不同权重系数, 得到两段视频的相似度  $S$ 。

$$S = W_1 \times S_1 + W_2 \times S_2 \quad (10)$$

在构建视频语义相似度网络时, 不是对整个视频库中所有视频两两之间都计算其相似度, 有些根本不相关的没有必要进行计算。在利用视频语义模型进行标注时, 先由人工将相关或者有相似度的进行聚类, 然后在此基础上计算视频的相似度, 构建相似度网络。相似度值采用图论中的邻接矩阵方式进行存储, 例如网络中有  $m$  个节点代表的视频相似, 其相似值邻接矩阵如下:

$$\begin{pmatrix} a_{11} & \cdots & a_{1m} \\ \vdots & & \vdots \\ a_{m1} & \cdots & a_{mm} \end{pmatrix}$$

矩阵的对角线元素为0。

## 3 检索算法

视频语义相似度网络构建以后, 对于视频的检索和候选视频的选择不能再按照以前的方法, 必须设计新的算法。在给出新的算法前, 先引入两个参数。

**定义2** 使用频度。指某个节点所代表的视频在一个回合的演习中使用次数的度量, 用  $f$  来表示, 其初始值为0。

$f$  值越大, 说明某个视频表现的战略决策越多, 下次选用该视频表现某类决策的可能性也越大, 那么该视频节点下聚集的决策也越多, 形成“富者越富, 穷者越穷”的现象。在设计算法时就是要避免这种现象的出现。

当用同一个视频反复表现类似的新闻事件时, 战略对抗演习的参演者就会出现“审美疲劳”现象。战略对抗演习中的“审美疲劳”现象会影响虚拟新闻的表现效果, 导致整个虚

拟信息环境的逼真度下降, 为了克服这种现象, 引入第二个参数。

**定义3** 效果满意度。指某个视频在一个回合中所表现的新闻事件给参演者所带来的满意程度, 用  $k$  来表示, 它与两个因素有关: 1) 该视频的使用频度  $f$ ; 2) 某个回合当前新闻的总数  $n, k = f/n$ 。从多次演习的实际情况来看,  $k$  不超过其阈值  $t = 0.04 = 4\%$  比较合适。

引入了以上两个参数后, 视频的检索和选择算法描述如下。

**步骤1** 根据战略词典, 从战略决策中提取关键字 keyword(详见文献[5]), 找到一级中心节点;

**步骤2** 根据 keyword, 找到入口二级中心节点  $n_1$ ;

**步骤3** 计算  $n_1$  的满意度  $k$ , 若  $k < t$ , 选择  $n_1$ , 转到步骤6;

**步骤4** 选择  $n_1$  最相似的节点, 若最相似的节点是挑选过程被放弃的节点(即节点的  $k > t$ ), 选择次相似的节点, 直到找到合适的节点, 记为  $n_i$ ;

**步骤5** 计算  $n_i$  的满意度  $k$ , 若  $k < t$ , 选择  $n_i$ , 转到步骤6, 否则重复步骤4中的过程进行选择;

**步骤6** 算法结束。

## 4 实验结果分析

为了突出对比性, 对以前演习中的数据进行了多次实验, 下面以其中的一个回合数据为例进行说明, 实验前的数据如表2所示。对该回合应用视频语义相似度网络研究的成果的实验数据如表3所示。

表2 某回合实验前数据

视频 ID	使用次数	所占比例/%	视频 ID	使用次数	所占比例/%
1761	14	14.89	1762	3	3.19
2467	9	9.57	2819	2	2.13
2766	8	8.51	2812	2	2.13
2707	6	6.38	2805	2	2.13
2813	3	3.19	2792	2	2.13
2764	3	3.19	2788	2	2.13
2468	3	3.19	2779	2	2.13
1774	3	3.19	2765	2	2.13
1767	3	3.19	2755	2	2.13

使用次数为1, 所占比例为1.06%的有23项, 未在表2中列出。算上这23项, 视频使用的总次数为94, 所有的百分比都是根据此计算得出。表2中前4项每个视频使用次数所占比例都超过了效果满意度阈值  $t$ 。

表3中未将表2中所占比例小于效果满意度阈值  $t$  的数据列出。实验后对于满意度超过阈值  $t$  的分别用相似度网络中其他视频来代替, 使得所有的视频所占的比例都能达到满意度的要求, 同时对单个视频的表现效果不会产生质量的下降, 反而提高了整体的表现效果。

## 5 结语

构建一个逼真的虚拟信息环境对于战略对抗演习的训练效果有着非常重要的影响。虚拟新闻系统是组成虚拟信息环境中的关键要素, 其表现结果的好坏直接决定着虚拟信息环境的质量。针对几年以来虚拟新闻系统中视频使用次数呈现

出类似于复杂网络理论中的“富者越富,穷者越穷”的现象,本文提出利用视频本身的语义相似性构建视频语义相似度网络,实验结果表明在不影响单个虚拟新闻表现效果的前提下,增加了每个视频被选择使用的机会,丰富了表现的视频画面,总体上提高了整个虚拟新闻系统的表现效果,从而提高了虚拟信息环境的逼真度。

表3 某回合实验后数据

视频 ID	使用次数	相似的 ID	所占比例/%
1761	3	—	3.19
1802	3	1761	3.19
1837	3	1761	3.19
1849	3	1761	3.19
1945	2	1761	2.13
2467	3	—	3.19
1627	3	2467	3.19
1388	3	2467	3.19
2766	3	—	3.19
1661	3	2766	3.19
1202	2	2766	2.13
2707	3	—	3.19
1401	3	2707	3.19

本文以不同对象之间内在的相似性为突破点,研究其相似度,增加相似性对象被选中的机会,对于其他信息检索领域类似的需求也具有一定的参考意义。

#### 参考文献:

- [1] 董献洲, 胡晓峰, 吴琳. 虚拟新闻的表达与生成及其系统设计与实现[J]. 系统仿真学报, 2006, 18(12): 3634-3636.
- [2] 陈芳莉, 胡晓峰, 吴琳, 等. 虚拟新闻模拟系统的研究与设计[J]. 计算机仿真, 2007, 24(8): 5-7.
- [3] 周生, 胡晓峰, 罗批. 战略对抗演习中的态势表现方法研究[J]. 装备指挥技术学院学报, 2009, 20(3): 96-99.
- [4] 司光亚, 胡晓峰, 吴琳. “沉浸式”战略决策训练模拟系统研究与实现[J]. 系统仿真学报, 2006, 18(12): 3581-3583.
- [5] 周生, 胡晓峰, 罗批. 虚拟新闻系统的自动化设计研究[J]. 计算机工程与应用, 2008, 44(12): 20-23.
- [6] 汪小帆, 李翔, 陈关荣. 复杂网络理论及应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2006.
- [7] BARABASI A L, BONABEAU E. Scale-free networks[J]. Scientific American, 2003(5): 50-59.
- [8] 杨士强, 孙立峰, 崔鹏, 等. 视频的语义挖掘[J]. 中国计算机学会通讯, 2009, 5(7): 30-35.
- [9] HACID M S, DECLEIR C. A database approach for modeling and querying video data[C]// Proceedings of the 15th International Conference on Data Engineering. Washington, DC: IEEE Computer Society, 2000: 729-750.
- [10] AYGUN R S, YAZICI A. Modeling and management of fuzzy information in multimedia database applications[J]. Multimedia Tools and Applications, 2004, 24(1): 29-56.
- [11] WANG Y, XING C X, ZHOU L Z. THVDM: A data model for video management in digital library[C]// Proceedings of the 6th International Conference on Asian Digital Libraries. New York: ACM, 2003: 178-192.
- [12] 余卫宇, 余英林. 视频语义信息的研究[J]. 计算机工程与应用, 2004, 40(6): 27-29.
- [13] 王煜, 周立柱, 邢春晓. 视频语义模型及评价准则[J]. 计算机学报, 2007, 30(3): 331-351.
- [14] 杨易, 郭同强, 庄越挺, 等. 基于综合推理的多媒体语义挖掘和跨媒体检索[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2009, 21(9): 1307-1314.
- [15] Society. Washington, DC: IEEE Computer Society, 2006: 147-155.
- [16] 雷丽晖, 段振华. 一种基于扩展有限自动机验证组合 Web 服务的方法[J]. 软件学报, 2007, 18(12): 2980-2990.
- [17] WOMBACHER A, FANKHAUSER P, MAHLEKO B, et al. Matchmaking for business processes based on choreographies[C]// Proceedings of the 2004 IEEE International Conference on E-Technology, E-Commerce and E-Service. Washington, DC: IEEE Computer Society, 2004: 359-368.
- [18] ZHENG YONGYAN, ZHOU JIONG, KRAUSE P. Analysis of BPEL data dependencies[C]// Proceedings of the 33rd EUROMICRO Conference on Software Engineering and Advanced Applications. Washington, DC: IEEE Computer Society, 2007: 351-358.
- [19] KHALAF R, KOPP O, LEYMAN F. Maintaining data dependencies across BPEL process fragments[J]. International Journal of Cooperative Information Systems, 2008, 17(3): 259-282.
- [20] 陈胜, 鲍亮, 陈平, 等. BPEL 流程数据竞争和死锁检测算法研究[J]. 西安电子科技大学学报: 自然科学版, 2008, 35(6): 1058-1062.
- [21] OASIS. Web Service Business Process Execution Language (WS-BPEL) [EB/OL]. [2009-12-1]. <http://docs.oasis-open.org/wsbpel/2.0/wsbpel-v2.0.pdf>
- [22] 翟岩龙, 宿红毅, 张晗, 等. 基于数据流优化的 BPEL 流程分割方法[J]. 华南理工大学学报, 2009, 37(4): 24-30.

(上接第1961页)

性,本文围绕 BPEL 数据竞争问题,在对 BPEL 2.0 中消息和活动之间关系进行分析的基础上,结合 XML 节点树特性,提出一种根据活动之间并序关系来检测潜在数据竞争的方法,为流程顺利部署奠定基础。

#### 参考文献:

- [1] 何积丰, 金芝, 李宣东. 面向服务的计算专利前言[J]. 软件学报, 2007, 18(12): 2965-2966.
- [2] 喻坚, 韩燕波. 面向服务的计算[M]. 北京: 清华大学出版社, 2006.
- [3] RAO J, SU X. A survey of automated Web service composition methods[C]// Proceedings of Semantic Web Services and Web Process Composition. Berlin: Springer-Verlag, 2004: 43-54.
- [4] SADIQ S, ORLOWSKA M, SADIQ W, et al. Data flow and validation in workflow modelling[C]// Proceedings of the 15th Australasian Database Conference. Darlinghurst, Australia: Australian Computer Society, 2004: 207-214.
- [5] CHUN OUYANG, VERBEEK E, van der AALST M P, et al. Formal semantics and analysis of control flow in WS-BPEL[J]. Science of Computer Programming, 2007, 67(2/3): 162-198.
- [6] MARTENS A, MOSER S, GERHARDT A, et al. Analyzing compatibility of BPEL processes[C]// International Conference on Internet and Web Applications and Services/Advanced International Conference on Institute of Electrical and Electronics Engineers Computer