

一种在多用户虚拟环境中的动态交互分析感知模型

A Dynamic Correlation Analysis based Awareness Model in MVE

丁大为 朱淼良

(浙江大学计算机科学与工程系 杭州310027)

Abstract Currently many traditional MVE(multi-user virtual environment) applications mainly use Grid and Locale approaches to filter perception information, which have limitation in virtual humans based social virtual environment simulation. Aiming at this kind of application, we propose a new awareness model for dynamic correlation analysis in MVE. Above all, we use a two-layered awareness model to manage perception information. Then we describe a correlation analysis approach to find out the interest focus of virtual humans. This model has been implemented in a prototype multi-user virtual environment system, which demonstrates the effects of our approach on optimizing visual rendering and perception.

Keywords MVE(Multi-user Virtual Environment), Correlation network, Dynamic interest management, Collaborative perception, Interaction analysis, VRML, JAVA

1. 引言

协作式虚拟环境(CVE)日益广泛地被用于军事和工业协作,协同设计和游戏等。其中多人共享的虚拟环境成为最关键和最有潜力的应用方向。虚拟人(virtual human)是人在计算机生成空间(虚拟环境)中的几何特性与行为特性的表示,是多功能感知与情感计算的研究内容。可以广泛应用于人机交互、运动表示、人机功效、视频压缩、游戏娱乐、军事训练、数字图书馆等领域。

在多人共享虚拟环境中,用户采用化身(avatar)的形式和周围环境交互,而这种交互行为的基础就是虚拟化身对环境的感知能力。当能够感知到周围环境的变化,虚拟化身就能够操作环境中的物体,与其他用户的虚拟化身交互,并根据环境变化来制定行动计划。在真实环境中,人们在社交或者协同工作中通常采用特定的肢体语言来表达对周围事物的关注和感知,例如指点、凝视、触碰等等。随着应用的增加,虚拟人的社交行为日益得到重视,尤其在社交性的虚拟环境应用中,如虚拟会议、比赛、表演等场合,尤其是在较大规模的虚拟城市、虚拟社区的仿真中,虚拟人之间的交互在人们交流中起到了重要的作用。

2. 相关研究

2.1 实时场景绘制

在虚拟环境中,为了能够较快地生成各种场景,一般先采用多边形网格法生成场景描述,但由于采样精度高,由此建立起的三维模型的复杂程度远远超过了当前计算机实时的图形处理能力。实时场景一般具有以下特征:若某个对象在屏幕上所占的面积大,则它对整个场景的贡献也大,其细节模型也就

应复杂一些,因此当视点移动速度快或离目标远时,可采用粗略的模型显示,反之采用较细致的模型显示,这个特征称为 LOD 特征,该特征不仅可以有效地提高显示速度,而且符合人类的视觉感受。LOD 技术为每个对象建立多个相似的模型,不同的模型对景物的细节描述不同,景物细节的描述越精确,模型也就越复杂。为此人们提出了多细节层次模型的自动生成方法^[8],用来有效地控制场景复杂度。

2.2 协同感知

在多人共享虚拟环境中,协同感知的研究主要集中在以下几个关键领域^[3]:1. 存在感知;2. 位置感知;3. 化身识别;4. 兴趣焦点感知;5. 行为感知;6. 身份感知。随着多人共享虚拟环境中用户数量的增加,如何有效地在用户中传递虚拟环境的状态更新(即用户对虚拟环境的感知)成为重要的研究领域。

随着虚拟环境真实度的日益提高,大规模的虚拟环境采用兴趣管理(Interest Management)^[1]的概念来减少消息广播带来的巨大网络开销。兴趣管理的实现有许多种不同的方案。在 HLA 系统中^[7]将整个场景划分为一个个固定大小的区域(Grid),每个区域对应一个组播组。这种静态的基于区域分割的兴趣管理方案的缺点是不适应仿真中的动态变化需求。另外一种方案是根据场所(Locale)的概念来过滤感知信息^[5]。这种方法在 SPLINE 系统中首次出现,一个场所是虚拟环境的一个基本组成单位,如一个房间、走廊、车辆。虚拟环境由多个场所互连接起来。系统中的感知信息将只分发到本场所和所有相邻的场所中,通过这种方法来将感知信息限制在有限的范围内。这种方法尤其适用于大规模的多用户虚拟系统。

3. 模型设计

在一些共享虚拟环境的应用中,基于地域的信

息过滤不能够很好地发挥作用,尤其是在场景开放的、社交性的虚拟环境仿真中,例如虚拟会议。在这些情况中,场景本身不象大规模虚拟仿真中那样巨大,而其中的对象比较密集,难以通过区域分割来进行信息过滤;由于用户虚拟化身的介入,场景复杂度大大增加,用户化身的动作表情都作为场景状态更新,则使得状态更新信息量甚为巨大。而最显著的特点是,在这些场景中都有大量的同类型物体(如虚拟人化身),而这些物体对用户来说并非等同对待,通常用户只对社交或者协同工作对象要求较高精度的场景绘制和状态更新同步,而对场景中的其他虚拟人不甚注意。

这种基于交互关系的感知层次使得在实时多人共享系统中进一步过滤虚拟环境信息,简化场景复杂度提供了一个新的思路。基于这种多人共享的虚拟环境特性,我们设计了一种新的协同感知模型,通过分析用户化身间的相互作用关系来进行动态的兴趣管理。

3.1 双层感知管理模型

我们的方法将建立一个双层结构的感知管理模型,用来建立多人共享协作式虚拟环境。底层采用预定义的静态属性约束来描述原子对象,并通过用户兴趣模板过滤感知对象。上层模型则在底层的基础上,通过动态分析交互活动来实时调整对象之间的感知度。我们将虚拟环境中的对象分为两类:自主对象(ActiveObject)和被动对象(InactiveObject)。最显而易见的一类自主对象就是虚拟人化身(Avatar),这类对象能够主动地和虚拟环境中的其他对象进行交互。被动对象则相反,它们不能主动地和虚拟环境中的其他对象进行交互。

在许多虚拟环境的仿真中,环境中许多对象之间只是部分地具有相关性,而对其他对象不产生交互行为。例如虚拟会议、虚拟社区、虚拟音乐会等等。在这种情况下,用户与用户之间的相关度体现了用户的兴趣分布,因此我们在建构的共享虚拟环境里可以对场境内的用户进行相关性分析,根据得到的相关度来定义所需的感知度。通过不同级别的感知度,可以有效地过滤掉相关度低于某个阈值的信息,控制虚拟环境中的信息流量,同时降低无关视觉信息绘制的开销,提高用户感兴趣部分的视觉精细度。

我们将对象相关度定义为 $Correlation(m, n) \in [0, 1]$ (以下简称 $C(m, n)$), 满足:

$$\begin{cases} C(m, m) = 1 \\ C(m, n) = 0, \text{当 } m \text{ 对 } n \text{ 不感兴趣} \\ C(m, n) = 1, \text{当 } m \text{ 对 } n \text{ 非常感兴趣} \end{cases}$$

当 $C(m, n) = 0$ 时表示 m 对 n 不感兴趣, 相关度最低; 当 $C(m, n) = 1$ 时表示 m 对 n 很感兴趣, 相关度最高。一般相关度函数对 m, n 不对称。影响相关

度函数值的主要因素有: 预定义属性和实时交互行为。

3.2 静态属性约束

虚拟环境中的对象支持一组通用属性和自定义的扩展属性。对象定义自己的对象类型、属性等信息, 用户通过描述其希望接收的对象类型、对象属性和交互类型等信息, 就可以实现静态的对象类层次和属性层次的感知数据过滤。对象的自身属性定义以属性/值的形式出现, 在实现中可以通过 XML 定义。下面是我们的虚拟环境中对象的属性模版定义:

```
<xsd:element name="VRObject">
  <xsd:attribute name="id" type="String"/>
  <xsd:attribute name="role" type="String"/>
  <xsd:attribute name="type" type="String"/>
</xsd:element>
```

由于用户在一开始就对虚拟环境有了一定的兴趣趋向, 所以在进入虚拟环境以前, 用户可以预先定义一些属性来定义自己的兴趣模板。兴趣模板描述了用户对特定对象的相关度, 相关度的大小用 0-1 之间的小数表示, 作为用户对其他对象的相关度函数的初始值。下面是虚拟环境中用户兴趣模板定义:

```
<xsd:element name="Interest">
  <xsd:attribute name="value" type="float"/>
  <xsd:union memberType="Property"/>
</xsd:element>
<xsd:element name="Property">
  <xsd:attribute name="name" type="String"/>
  <xsd:attribute name="condition" type="String"/>
  <xsd:attribute name="value" type="String"/>
</xsd:element>
```

3.3 动态交互分析

当共享虚拟环境建立以后, 随着用户之间和用户与其他对象的交互行为, 用户对协同感知的要求也随之变化。用户的兴趣焦点很大程度上受到交互行为的影响。我们将对象之间的主要交互关系集 I 分解为五种: 指点、抓取、触碰、凝视、交谈。通常每一种特定的交互关系暗示了用户对对象的感兴趣程度。上述的五种交互行为, 按照类似于 WWW 中的超连接(HyperLink)的形式将用户联系起来, 每一个连接描述了一定程度的特定交互行为和交互关系。将所有的这些对象通过相互感知兴趣关系连接起来以后, 就可以建立起一个相关性网络(Correlation Network), 如图1所示。

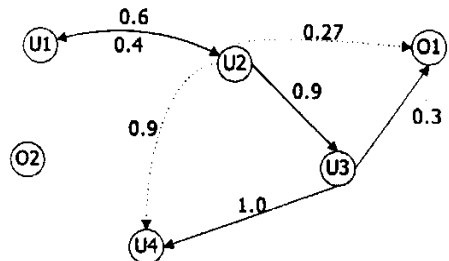


图1 相关性网络(Correlation Network)

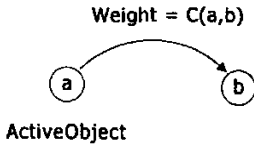


图2 有向边

相关性网络(Correlation Network)中的每个节点都是虚拟环境中的一个独立对象,包括主动对象和被动对象。这些节点之间通过有向边连接。相关性网络(Correlation Network)中有向边的定义如下:

当对象 a 对对象 b 感兴趣,且兴趣度为 $w=C(a,b)$ 时,则节点 a 与节点 b 之间存在一条自 a 向 b 的有向边,边的权重为 $w=C(a,b)$ 。由定义易见,有向边的起始节点必定为主动对象(ActiveObject),即有向边只能从主动对象发出(见图2)。图1中的实线边即为相关性网络的有向边。

根据不同类型的相关性网络,我们可以定义网络的相关性阈值 $T_c \in [0,1]$ 。当相关度 $C(a,b) < T_c$ 时,可以认为对象 a 对对象 b 的兴趣度不足以影响协同感知行为,a 到 b 方向即不存在有向边。

定义了相关性网络后,我们指出一个相关性网络的基本特征——相关度传递原则,即:相关性网络中,从某个节点 n 出发的有向边的变化将通过指向节点 n 的有向边反馈到网络中其他节点上。事实上,虚拟环境中一个用户化身的交互行为的兴趣焦点很多情况下都是随着其感兴趣的用户间的交互行为而动态变化。例如,在一个虚拟会议中,假设与会用户为 $U = \{U_1, U_2 \dots U_n\}$,共 n 人,其中主持人为 U_1 。则有:

1. 预定义情况下,用户只知道自己的注意力焦点应该放在会议主持人身上,而对其他与会者及未知对象兴趣暂置为低感知度。则通过静态属性设置,将与会用户的注意力焦点集中在会议的主持人化身上:

$$\begin{cases} C(U_k, U_m) = 1, m = 1 \text{ or } k = m \\ C(U_k, U_m) = 0.2, m \neq 1 \text{ and } k \neq m \end{cases}$$

2. 在虚拟会议过程中,当与会者 U_i 与某与会者 U_j (对象 O_j) 产生交互行为(询问、指点、抓取、凝视等)时,则 U_i 对该与会者 U_j (对象 O_j) 的兴趣度增加,在相关性网络中两者的相关联接权重增加。

3. 当用户 U_i 对用户 U_j (对象 O_j) 兴趣度增加时,这种兴趣度的变化通过相关性网络反馈到其他对 U_i 感兴趣的与会者,这些对 U_i 感兴趣的其他与会者对 U_j (O_j) 化身的兴趣度自然地增加。

可见,在虚拟环境的动态交互过程中,用户化身的感知兴趣变化会通过相关性网络的联接反馈到整个虚拟环境中的其他用户处,从而影响其他用户的感知兴趣。因此,我们可以建立起相关性网络(Correlation Network)的动态反馈模型:

首先我们定义有向路径的权重函数。设相关性网络中的有向路径 P 为有向边 $v_1v_2, v_2v_3, \dots, v_{n-1}v_n$ 连接而成,则 $Weight(P) = C(v_1, v_2) * C(v_2, v_3) * \dots * C(v_{n-1}, v_n)$ 。

设在某一时刻 t,对象 m, n 之间发生交互行为 $INT(m, n, t) \in I$,考虑 m 对 n 的兴趣变化,有 $\Delta C(m, n) = INT(m, n, t)$ 对 m 的兴趣度的影响,则对于 $\forall u \in U$,如果 u 和 m 之间存在 k 条有向路径 P_1, P_2, \dots, P_k ,那么 m 对 n 的兴趣变化反馈到其他主动对象对 n 的兴趣变化为

$$\Delta C(u, n) = \Delta C(m, n) * \sum_{i=1}^k Weight(P_i)$$

当 $C'(u, n) = C(u, n) + \Delta C(u, n) > 1$ 时,即取 $C'(u, n) = 1$

同样, n 对 m 的兴趣变化也以同样的方式反馈到相关性网络(Correlation Network)中的各节点。一般情况下,我们将兴趣反馈的路径长度限制为 3,以降低计算复杂度,并且提供更为合理的结果。

图1中的虚线边即为相关性网络根据相关度传递原则得到的兴趣反馈的效果示意。需要注意的是,兴趣反馈不改变相关性网络中有向边的权重,因而不会影响其他用户间的兴趣反馈。一旦引起反馈的交互行为结束,兴趣反馈即随时间衰减,此时如果用户没有进一步的交互行为产生,则反馈将逐渐消失: $\Delta C_T(u, n) = \frac{\Delta C(u, n)}{T+1}$,当引起反馈的交互行为结束 T 分钟。

4. 设计实现

4.1 系统结构

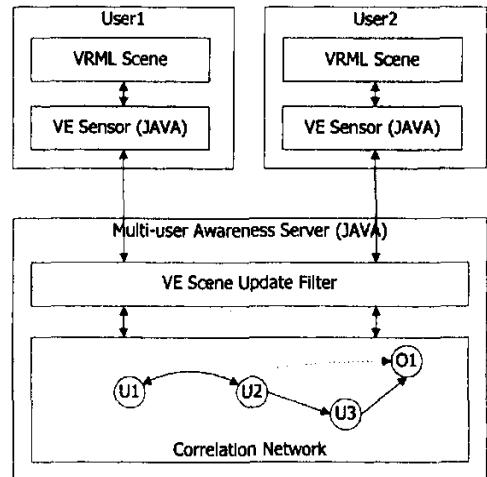


图3 系统体系结构

为了检验我们的方法,我们设计实现了一个原型系统。该环境提供了一个虚拟会议的应用实例。在实现上,我们采用 VRML、EAI 接口和 JAVA 设计实现原型。要使异地的多个用户能协同工作,共同生

成一个 VRML 虚拟空间。必须使得所有用户当前获得的信息保持一致,实现协同感知的效果,使用户能感知当前群体工作的状态。我们采用集中式系统结构,建立了多人共享的虚拟环境,如图3。

协同感知服务器(Multi-user Awareness Server)的执行机制如下:

1. 当一个用户第一次加入到虚拟环境中,首先将预定义的静态兴趣模板发送到协同感知服务器中。协同感知服务器将在相关性网络中插入新的节点,并根据兴趣模板建立该节点与其他节点的初始相关度。

2. 用户在客户机上所产生的场景更新信息(用户的位置变化、所执行的动作),如用户化身移动或转向、化身自身动作、用户间的交谈等,可形成一个场景更新事件,传送给协同感知服务器。

3. 协同感知服务器判断该事件是否会改变用户之间的相关度。如果会,则根据规则将该事件输入相关性网络,根据反馈模型调整整个相关性网络的参数。然后根据相关性网络的值,虚拟环境更新过滤器(VE Update Filter)将相关性较低的用户节点过滤掉,将该事件广播到相关度达到阈值的用户节点上。

$\begin{cases} a \text{ 对 } b \text{ 无感知, 当 } 0.0 \leq C(a, b) < 0.2 \\ a \text{ 对 } b \text{ 存在感知, 当 } 0.2 \leq C(a, b) < 0.6 \\ a \text{ 对 } b \text{ 状态感知, 当 } 0.6 \leq C(a, b) \leq 1.0 \end{cases}$	$\begin{cases} \text{服务器不向 } a \text{ 转发 } b \text{ 的状态更新信息, 当 } a \text{ 对 } b \text{ 无感知} \\ \text{服务器只向 } a \text{ 转发 } b \text{ 的位置更新信息, 当 } a \text{ 对 } b \text{ 存在感知} \\ \text{服务器向 } a \text{ 转发 } b \text{ 的所有状态更新, 当 } a \text{ 对 } b \text{ 状态感知} \end{cases}$
--	---

即相关性网络的阈值 $T_c = 0.2$ 。

同时,根据 a 对 b 的感知层次,采用 LOD 来相应简化对用户不感兴趣对象的视觉细节,降低实时更新复杂场景的运算压力。图4-5展示了从一个用户 alan 的视角观察到的虚拟场景变化。

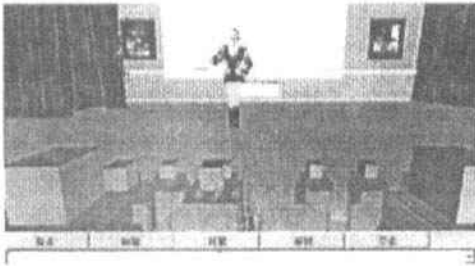


图4 多人共享虚拟环境用户起始状态

图4为起始状态,用户 alan 定义的兴趣模板将兴趣焦点集中于主持人,对其余用户兴趣度低:

$$\begin{cases} C(\text{alan}, \text{主持人}) = 1.0 \\ C(\text{alan}, \text{投影屏幕}) = 0.5 \\ C(\text{alan}, \text{其它对象}) = 0.2 \end{cases}$$

此时 alan 的系统特征为:

1. 在场景描绘上,系统根据兴趣度采用不同的 LOD,其中主持人采用高 LOD 模型,其余用户的虚拟化身和对象采用低 LOD 的模型。

2. 在共享感知信息的过滤上,系统根据兴趣度

4. MVE 中其他用户接收到场景更新事件后,通过 EAI 接口及时改变他们的 VRML 虚拟空间的状态。

4.2 多用户感知

要使用户间在交互的同时,能感知到对方的身体动作和面部表情,根据在3.3中定义的主要交互关系集,我们对用户化身预先定义了五种动作行为:指点、抓取、触碰、凝视、交谈。用户可通过人机界面选择并操纵化身执行这个行为。这些行为直接反映了用户对虚拟环境中对象的兴趣度,成为相关性网络的直接外部驱动因素。我们定义了一组简单的参数来实时调整用户化身间相互作用对感知度的直接影响,并通过相关度函数反映出来:

$$\begin{cases} \Delta C(a, b) = 0.3, \text{ 当 } a \text{ 指点 } b \\ \Delta C(a, b) = 0.8, \text{ 当 } a \text{ 抓取、触碰 } b \\ \Delta C(a, b) = 0.2, \text{ 当 } a \text{ 凝视 } b \\ \Delta C(a, b) = 0.5, \text{ 当 } a \text{ 与 } b \text{ 交谈} \end{cases}$$

我们为虚拟环境中的协同感知设定了三个不同的层次:无感知、存在感知、状态感知。这些感知层次采用相关度函数和协同感知服务器策略定义如下:

我们为虚拟环境中的协同感知设定了三个不同的层次:无感知、存在感知、状态感知。这些感知层次采用相关度函数和协同感知服务器策略定义如下:过滤不同层次的信息。用户接收主持人的细节信息(如手势、表情、声音),对兴趣度低的其他用户化身只接收位置信息。

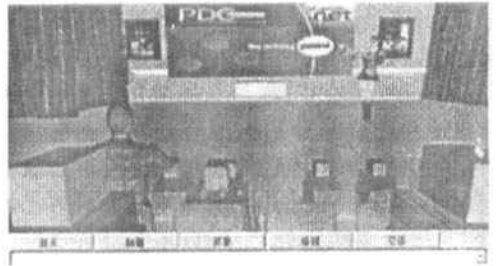


图5 多人共享虚拟环境用户交互过程

图5描述了用户交互过程中,系统计算兴趣变化并自动调整场景描绘和感知信息过滤。图中出现了两种交互关系:主持人指点投影屏幕和主持人与用户 bob 交谈。根据3.3定义的交互关系对相关度函数的影响,主持人对投影屏幕和用户 bob 的相关度增加。根据相关度传递原则,这种变化通过相关性网络反馈给用户 alan,表现为相关度函数变化:

$$\begin{cases} C(\text{alan}, \text{主持人}) = 1.0 \\ C(\text{alan}, \text{bob}) = 0.2 + 0.5 * 1.0 = 0.7 \\ C(\text{alan}, \text{投影屏幕}) = 0.5 + 0.3 * 1.0 = 0.8 \\ C(\text{alan}, \text{其它对象}) = 0.2 \end{cases}$$

由此 alan 的系统相应做如下调整:

1. 场景描绘上,增加了对投影屏幕和用户 bob 的 LOD,采用较高精度模型。

2. 协同感知上,用户接收 bob 的细节信息(包括手势、声音),同时也接收投影屏幕的实时内容更新。

可见,这种采用动态相关性分析的协同感知模型为社交性和协同工作性的共享虚拟环境仿真提供了一个灵活有效的方法。

结论 本文建立了一个双层结构的感知管理模型,通过定义静态兴趣模版和动态兴趣管理过滤感知信息,建立多人共享协作式虚拟环境。在动态兴趣管理中,我们采用了相关性网络和相关度传递原则来分析用户化身间的交互活动,通过用户化身间的交互分析来实时调整对象之间的感知度。我们定义了一组交互关系集,以及一个交互分析策略,并以此为基础建立了一个多人虚拟环境的原型系统来验证模型的效果。

我们未来的工作是进一步建立更为真实的交互分析策略,包括对交互行为的细分和考虑对象间距离、作用时间等因素的影响,以及通过用户头部跟踪实现更合理的凝视感知。此外结合自动生成多细节层次模型的方法,使场景中的对象在用户感知层次变化过程中,获得更平滑的视觉变化。在较大规模的虚拟环境如虚拟城市的仿真中,可以将动态相关性分析与采用区域场所概念的兴趣管理方法结合起

来,同时采用组播(Multicast)来进一步优化网络通信,提高虚拟环境场景实时性和用户满意度。

参考文献

- 1 Morse. K L, Bic L, Dillencourt M. Interest Management in Large-Scale Distributed Simulations, 1996
- 2 Capin T K, Pandzic I S, Thalmann D, Thalmann N M. Realistic avatars and autonomous virtual humans in VLNET networked virtual environments. Virtual Worlds on the Internet, J. Vince and R. Earnshaw, eds. IEEE Computer Society, Los Alamitos, 1998. 157~173
- 3 Thalmann D. The Role of Virtual Humans in Virtual Environment Technology and Interfaces. In: Proc. of Joint EC-NSF Advanced Research Workshop, Bonas, France, 1999
- 4 Manninen T. Rich Interaction in Networked Virtual Environments. Multimedia. In: Proc. the 8th ACM intl. conf. on multimedia, 2000. 517~518
- 5 Purbrick J, Greenhalgh C. Extending Locales: Awareness Management in MASSIVE-3. In: Proc. of Virtual Reality, Feb. 2000
- 6 Logan B, Theodoropoulos G. Dynamic interest management in the distributed simulation of agentbased systems. In: Proc. of the Tenth Conf. on AI, Simulation and Planning, AIS2000, Society for Computer Simulation International & ACM SIGSIM, 2000. 45~50
- 7 Berrached A, Beheshti M. Alternative approaches to multicast group allocation in HLA data distribution. In: Proc. of the 1998 Spring Simulation Interoperability Workshop, 1998
- 8 潘志庚, 马小虎, 石教英. 虚拟环境中多细节层次模型自动生成算法. 软件学报, 1996. 526~531

(上接第130页)

就可以获得八幅插值图像。显然,本算法兼具了基于形状的插值方法的优点和线性插值运算速度快的优点。

结论 基于形态学骨架提取的插值算法是一种基于形状的插值方法。形态学骨架提取能很好地保留物体目标的基本特征。形态骨架匹配过程同时提供了平移、旋转和缩放信息。在插值切片目标的骨架点集合获得步骤中采用了基于形状的插值算法得到插值骨切片的架点集。此外,由于基于形态学骨架提取的插值算法的主要步骤只对占整个目标点很小一部分的点进行操作,因此它大大地减少插值过程中计算量同时还能用于插值切片的压缩。因此,基于形态学骨架提取的插值算法是一种简单、快速、有效的三维图像层间插值方法。

参考文献

- 1 管伟光. 体视化技术及其应用. 电子工业出版社, 1998
- 2 Goldwasser S M, Reynolds R A, Talton D A, Walsh E S. Techniques for the rapid display and manipulation of 3-D biomedical data. Comp. Med. Imag. and Graphics. 1988. 12:1~24

- 3 Lin W C, Liang C C, Chen C T. Dynamic elastic interpolation for 3-D medical image reconstruction from serial cross-sections. IEEE Trans. Med. Imaging, 1988, 7: 225~232
- 4 Chen S Y, et al. Improvement on dynamic elastic interpolation technique for reconstructing 3-D objects from serial cross-sections. IEEE Trans. Med. Imaging, 1990, 9: 71~84
- 5 管伟光. 体数据可视化及其在医学中的应用: [中国科学院自动化研究所博士论文]. 1995
- 6 Raya S P, Udupa J K. Shape-based interpolation of multidimensional objects. IEEE Trans. Med. Imaging, 1990, 9: 32~42
- 7 Herman G T, Zheng J, Bucholtz C A. Shape-based interpolation. IEEE Comput. Graphics Applicat., 1992, 12(3): 69~79
- 8 Higgins W E, Morice C, Ritman E L. Shape-based interpolation of tree-like structures in three-dimensional images. IEEE Trans. Med. Imaging, 1993, 12(3): 439~450
- 9 Lotufo R A, Herman G T, Udupa J K. Combining shape-based and grey-level interpolation. In: Proc. SPIE Visualization Biomed. Comput., 1992. 289~298
- 10 章毓晋. 图像处理与分析. 北京: 清华大学出版社, 1999
- 11 沈傲东, 王刚. 三维表面重建详细技术报告. 西安盈谷科技有限公司, 2002
- 12 Besl P J, McKay N D. A method for registration of 3-D shapes. IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1992, 14: 239~256