

中图法分类号: TP391.41 文献标识码: A 文章编号: 1006-8961(2014)06-0955-09

论文引用格式: Li L, Tao T, Liu X P. Animation character model segmentation and labeling approach under the guidance of hierarchical structures [J]. Journal of Image and Graphics 2014, 19(6):955-963. [李琳, 陶涛, 刘晓平. 层次结构导向下的动画角色模型分割与标记 [J]. 中国图象图形学报 2014, 19(6):955-963. ] [DOI:10.11834/jig.20140617]

## 层次结构导向下的动画角色模型分割与标记

李琳, 陶涛, 刘晓平

合肥工业大学计算机与信息学院, 合肥, 230009

**摘要:** 目的 对3维角色模型进行语义化检索与重组的前提是进行准确的分割和标记。针对游戏与影视中应用广泛的3维角色模型,提出一种基于结构先验知识的角色部件分割和标记方法。方法 总结了动画角色模型的一般性结构规则,并形式化为可以指导分割的层次化知识表达;采用区域生长法逐层剥离模型部件,在此规则下进行末端检测与边界判断,同时对部件进行语义标记。结果 通过描述结构规则,在两足与四足角色模型上进行分割测试,得到了适合于重组的角色部件。结论 与其他可标记的角色模型分割方法相比,该方法具有更好的部件化结果,以及对动画角色有良好的扩展性。

**关键词:** 动画角色;层次结构;3维模型分割;3维模型标记

### Animation character model segmentation and labeling approach under the guidance of hierarchical structures

Li Lin, Tao Tao, Liu Xiaoping

School of Computer and Information, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China

**Abstract:** **Objective** The precondition of a 3D model retrieval and synthesis with semantics is accurate segmentation and labeling. For the 3D character model widely used in games and movies, we propose a method of character parts segmentation and labeling for animation based on a priori knowledge of the structure. **Method** After the structure rules of the animation character model are generalized, the rules are formalized with a hierarchical knowledge expression that can instruct segmentation. The regional growth method is used to detach the model parts layer by layer when the extremity detection and the boundary judgment can be guided by the rules. Simultaneously the parts are labeled a semantic name. **Result** Our method is tested on the biped / quadruped character model through the structure rules description. The segmentation results are character components that are suitable for synthesis. **Conclusion** Compared to other methods of character model segmentation with labeling, the result of our tests indicate that our method has more obvious parts, which can support model synthesis and has good extensibility to animation character.

**Key words:** animation character; hierarchical structure; 3D model segmentation; 3D model labeling

收稿日期:2013-09-22;修回日期:2013-12-13

基金项目:国家自然科学基金项目(61070124);安徽省自然科学基金项目(1208085MF107)

第一作者简介:李琳(1977—),讲师,合肥工业大学计算机应用技术专业博士研究生,主要研究方向为虚拟现实与人机交互。

E-mail: lilin\_julia@163.com

## 0 引言

当前,动画产业发展迅猛,3维动画角色广泛应用于影视动画和游戏中。如何利用已有的3维角色数据来创造新的角色模型成为辅助角色设计师进行创新的关键性问题,对已有动画角色的检索和部件重组是针对该问题的可行解决方案,而这两者都需要动画角色模型分割与标记的支持。本文试图针对动画产业中的3维角色这一对象,探索一种操作简单且能批量处理的实用化分割与标记方法。

模型分割是计算机图形学、几何建模和计算机辅助设计中的一个基础研究问题,有着丰富的研究成果和测试标准<sup>[1-2]</sup>。传统分割算法主流的思路是根据网格的各种几何特征,使用分水岭方法<sup>[3]</sup>、聚类方法<sup>[4]</sup>、种子生长方法<sup>[5]</sup>来寻找分割边界。分水岭方法全局观较差,很难得到有意义的部件分割结果;聚类方法面向全局,但目标函数很难定义,普适性不强,容易出现过分割现象;Golovinskiy等人<sup>[6]</sup>使用了层次聚类的方法,逐步求精改进了这一问题;马亚奇等人<sup>[7]</sup>利用Laplace谱嵌入特征,使用Mean Shift聚类方法实现了一致性分割;但是全局判断模式使得部分分割结果可能并不能满足用户的意向。因而本文重点考察了区域生长法,可以在全局观下控制局部的搜索条件。Lavoué<sup>[8]</sup>将顶点曲率作为聚类生长的标准;韩丽等人<sup>[9]</sup>通过离散曲率来划分三角网;LEVY等人<sup>[10]</sup>通过计算特征轮廓来代替通过选取初始种子,实现了多源区域生长。Eck等人<sup>[5]</sup>通过在网格上创建类Voronoi图分割块,利用多源区域生长法来分割网格。在仅考虑几何意义的生长法中,一般不考虑带有语义目标的控制条件。

这些传统分割方法较少考虑用户的意向和分割结果的意义,工作创新大都在于分割效果和速度的改良,而本文工作的目标是要产生带有标记的角色语义部件。所幸近年来带有语义标记的分割结果也产生了很多方法。交互式分割结合了用户的分割意向,有利于得到有意义的分割结果。Fan等人<sup>[11]</sup>设计了交互式模型分割系统,用户在模型上简单勾画就可以得到模型的分割边界。Au等人<sup>[12]</sup>通过在模型上交互式选取一点,结合网格特征和用户意向,通过投票方式得到最佳凹性等值线,进而得到了有意义的分割结果。人工交互标记尽管可以根据用户需

求来获取有意义的分割,但每次分割都需要人工干预,不适合批量作业。

通过学习多个同类模型的分割知识,进而得到同类模型的分割与标记方法。Hu等人<sup>[13]</sup>将协同的思想运用到模型分割上,在过分割的多个同类型模型建立相似联系,再对多分割块层次聚类得到有意义的分割结果。Evangelos等人<sup>[14]</sup>通过若干同类3维模型人工分割标记后进行学习,可以很好地分割出已学习的其他同类模型。这类数据驱动的方法利用前期的有效工作来总结同类模型内在的规则,提高了批量分割效率,问题在于同类样本库的收集比较耗时耗力,也需要经验。

游戏与影视中的动画角色经常推陈出新,结构变化,希望有一种不需要去搜集学习数据,利用角色对象的结构特征描述,就可支持角色设计师对同类结构角色进行正确分割并标记。文献表明,人为总结的先验知识在分割标记研究中亦可发挥重要的作用,尤其是专业领域。Xue等人<sup>[15]</sup>使用医生的先验知识定义模糊集,对医学图像MRI进行有效分割与标注;Hassan等人<sup>[16]</sup>面对医学骨骼模型,在K-means聚类几何分割的基础上,用已知经验知识进行标记,并指导最后的权重Voronoi图进行优化;陈启华等人<sup>[17]</sup>提出了基于测地距离的有语义人体分割,预先采用人体比例的先验知识进行粗分割。

因此,围绕3维动画角色的先验知识——层次结构的总结与表达,并如何导向层次化的区域生长分割过程进行了一些研究工作。侧重描述的亦是创新点的部分为:1)层次结构指导末端检测的语义判定,确定区域生长法的起点;2)采用相对高斯曲率计算区域生长法的初始边界;3)动画角色结构分布对初始边界进行更为准确的分析,构成区域生长法的终止条件。

## 1 动画角色的层次结构及其表达

### 1.1 动画角色的层次结构

常见的动画角色通常是两足/四足的脊椎类生物,虽然游戏影视里常有许多怪物出现,但基本都遵循一种结构:头、躯干、尾巴构成主体,胳膊、腿、翅膀、触角、爪子等构成肢干,肢干一般具有对称性,如图1所示。这些规则为分割过程带来了有价值的约束条件。

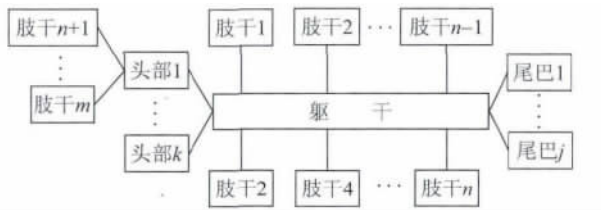


图1 动画角色的一般性结构

Fig. 1 The general structure of animation character

将这些知识分为两类:

1) 语义类。语义类知识给出该类生物模型带有人为意向性的部件描述,不同分割目的需要切分的结构可能不同,如有的应用需要切分整个手臂,有的应用只需要切分一个手掌,这种带有人为判断的目标仅靠几何自动分割是不可能满足的。

部件描述除了给予部件一定的语义,还需给出部件层次关系,从而对分割的顺序产生一定的指导作用。角色的这种主体—肢干结构使得模型的肢体末端特征很明显,将肢体距离头顶的远近及肢体间关系作为规划分割层次的一个因素。

如图2所示,后小腿部分离头顶距离最远,成为最易分离出的第1层。

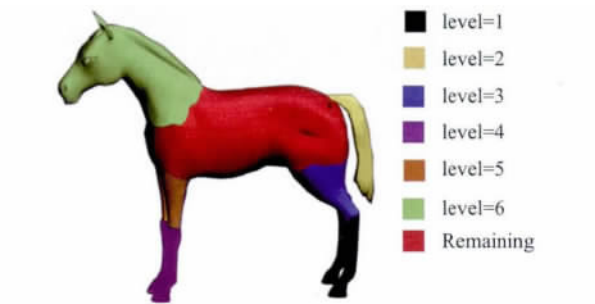


图2 四足角色的层次定义

Fig. 2 The level definition of quadruped character

2) 关系类。关系类知识给出了该类模型部件关系上的一些表述,从而利用这些信息进行分割层次的划分与分割边界的判断。主要包括拓扑连接关系、拓扑对称关系、分布关系。

关系类知识的一个作用是作为划分分割层次的另一影响因素,如四足角色头部末端明显,却不能成为先分的层次,因为在其他部件未知情况下边界很难定义,但是如果先找到前腿的分割边界,头部的边界与之有一个最短躯干连接的分布关系,便易于分割了。这个过程是人为分析的,因此不同人得到的分割层次可能并不相同,但同样能成功。图2是对此类四足角色比较成功的一个层次定义。

关系类知识的另一个作用是在分割的过程中提供搜索阈值和终止条件的目标指数或目标函数。

## 1.2 层次结构的表达

使用标签与标签内属性来刻画动画角色的层次结构,便于分割过程的解析,共有3种标签:

1)  $\langle \text{target} \rangle \langle / \text{target} \rangle$ :表示该层部件分割目标;

2)  $\langle \text{start} \rangle \langle / \text{start} \rangle$ :说明生长法的开始规则;

3)  $\langle \text{end} \rangle \langle / \text{end} \rangle$ :说明生长法的终止规则。

表1给出了3种标签所包含属性以及对应的内容。其中,level、num、symmetry和weight是数值类属性,name是字符串属性,distance、direction和connect使用在空间轴位置上的语义函数进行描述。因为存在空间判断条件,对所有实验的角色模型都进行了预处理,调整两足角色初始姿态使其直立方向为Y轴正方向,调整四足角色,腿部站立为Y轴正方向、头部方向为X轴负方向。

表1 规则的标签属性

Table 1 The tag attributes of rules

父标签	属性	含义
target 标签	level	分割层次/顺序
	num	该层部件个数
	symmetry	该层部件对称关系描述
start 标签	name	子部件的标签
	distance	末端测地距离的满足条件
end 标签	direction	该层末端的与其他层末端的关系
	weight	拓扑对称部件边界特征区域相似度因子的权重
	connect	该层部件与其他部件拓扑关系描述

## 2 模型几何特征提取

### 2.1 末端检测

网格顶点测地距离能够很好地表征末端顶点的特性,即使角色四肢尾巴等处于运动状态也不受影响。这里采用了Vitaly<sup>[18]</sup>的近似测地距离计算方法。因为动画角色的头顶一般具有非常显著的空间位置,而所有角色方位坐标系已调整一致,可以判断得出头部极值点作为测地距离计算参

考点。

层次结构是按照肢体与头部的远近进行设计的,一般情况下是找到最远的末端作为当前肢体层的起点;但是,不同动画角色肢体长短差异使得最远末端不一定是当前肢体层的起点,这种情况下则需要肢体的对称属性以及与其他层的方位关系来辅助判断。采用文献[17]的方法利用最大测地距离寻找末端顶点:多次阈值划分测地距离计算得到的结果,初始阈值为最大测地距离,折半计算划分,寻找肢体连通分支,直到连通分支中存在吻合该次分割所定义的 distance 和 direction 属性,辅以 target 标签的 symmetry 和 num 属性。最后,提取连通分支局部集合测地距离最大顶点,作为检测到的末端特征点。

如图3中四足动物的第1层后小腿分割,红圈给出马在第1层划分时所找到的末端点,蓝点是计算参考点。distance 属性为 MAX(head) 表示当前层是离头部最远的肢体, num 是 2,且 symmetry 是 Yes。在多次阈值划分后,发现两连通分支 X 轴方向离头顶点最远,则为该层末端。尾巴分支亦较远,但与后腿的差异体现在数目和对称性上。第2层后大腿分割 direction 属性为 CON(level1),也就是指连接第1层,因而第2层的起点直接就是第1层的划分边界点。其余各肢体的连通分支可用同样的方法分析,以作为每一层 3.1 节中所描述的区域生长法的起点。

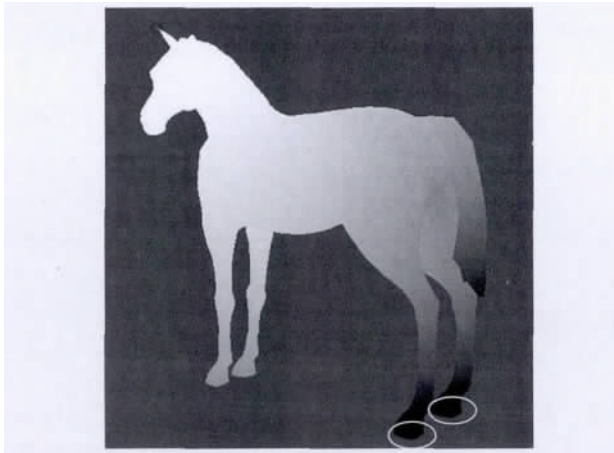


图3 测地距离及末端检测(颜色越深代表距离越远)

Fig. 3 Geodesic distance and end detection  
(the distance farther as the color darker)

使用动画角色层次结构中的属性指导发现每一层的肢体末端,从而确定区域生长法的起点是本文

的第1个创新点。

## 2.2 分割边界特征区域检测

高斯曲率表征着3维模型凹凸的显著特征,为分割边界的判断创造了依据。有很多网格顶点高斯曲率的计算方法<sup>[19]</sup>,这里采用 Meyer 的 Voronoi 方法。我们发现高斯曲率进行阈值后划分难以得到理想的结果,噪音比较多,局部特征不显著,无法形成明显的区域集合,所以使用了一种相对高斯曲率计算方法,易于去噪,且能得到更好的阈值划分效果,计算为

$$k_{\text{ComG}}(p_i) = \frac{\sum_{j=1}^{N(i)} (k_G(p_j) - k_G(p_i))^2}{N(i)} \quad (1)$$

式中  $N(i)$  是  $p_i$  的度,  $p_j$  是与  $p_i$  相邻的点,  $k_G(p_i)$  是  $p_i$  的高斯曲率。图4给出的是马模型的高斯曲率和相对高斯曲率阈值划分结果。

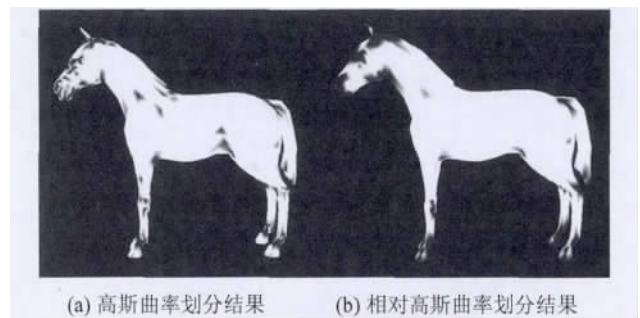


图4 曲率划分对比图

Fig. 4 The comparison chart of curvature division

阈值选取采取的是折半试探法,初始阈值为所有相对高斯曲率的中位值,直到满足特征连通区域数目小于一定的目标值。目标值与意向性分割的部件总数目相关,经过实验,最接近于这个数值 1~2 倍的划分可以较好地表征分割边界。

针对曲率阈值划分后的结果,结合顶点之间的拓扑连接性,聚合得到所有大于该阈值的顶点集合

$$U_{\text{FR}} = \bigcup_{i=0}^N R_{\text{F}}^i \quad (2)$$

式中  $R_{\text{F}}^i$  为某一具有连通特征的特征区域,  $U_{\text{FR}}$  为所有疑似边界特征区域的总体,  $N$  为  $U_{\text{FR}}$  中集合个数。

本小节侧重描述采用相对高斯曲率计算区域生长法的初始分割边界,可以起到良好的消除噪声作用是本文的第2个创新点。

### 3 逐层分割

#### 3.1 区域生长法

区域生长法以分割起点作为生长种子进行顶点集合增量式扩张,直到满足分割边界的要求。以顶点之间的拓扑连接性作为扩张规则,本文所提出的使用动画角色的层次结构知识来指导区域生长法的核心流程如下:

1) 根据 start 标签中所定义的 distance 和 direction 属性,辅以 target 标签的 symmetry 和 num 属性,采用 2.1 节中的测地距离阈值划分寻找满足条件的末端顶点作为种子顶点。

2) 为得到的 num 个种子顶点分别创建种子集合  $C_s^i$ ,  $i=1, \dots, num$ 。

3) 依次得到每个  $C_s^i$  的拓扑连接顶点  $C_{con}^i$ ,  $C_{con}^i = \{P_i | \exists P_j (P_j \in C_s^i \rightarrow \langle P_i, P_j \rangle) \wedge P_i \notin C_s^i\}$ ,  $\langle P_i, P_j \rangle$  表示  $P_i$  与  $P_j$  之间存在边连接关系。

4) 检测层次结构描述中的 symmetry 属性,若有对称关系,则采用对称终止条件,否则,采用独立终止条件;若不满足终止条件,将  $C_{con}^i$  归并到  $C_s^i$  中,转步骤 3) 继续生长。两种终止条件在 3.2 节中进行描述。

5) 终止生长后得到的种子集合即为当前层次分割得到的模型部件,使用该层的 name 进行标记。

#### 3.2 生长终止条件

动画角色的造型一般比较复杂,尤其在较为细致真实的造型中,即使采用相对高斯曲率,亦存在非边界的特征区域,属于干扰因素。为了避免区域生长在碰到这些错误边界时停止生长,必须有良好的机制加以判断。

##### 3.2.1 对称终止条件

从大量实例中发现,角色对称肢体的边界(关节处)通常都存在特征区域的相似性,而其他干扰因素却并无此特性,尤其是在肢体改变直立状态时。对于对称的肢体,往往属于同一层次,因此,将此层的对称肢体同时从种子开始生长,只有在碰到相似的特征区域时,才同时停止,否则就跳过此区域继续生长。以下详细说明了生长过程的点集增长与比较,以及区域相似度的计算公式。

2.2 节曲率阈值划分可得到疑似边界特征区域集合  $U_{FR}$ 。对该层存在 num 个对称部件的  $C_s^i$  同时

进行生长,产生 num 个  $C_{con}^i$ ,检测  $U_{FR}$  中所有集合与  $C_{con}^i$  的相交情况,为每个  $C_{con}^i$  找到一个代表的相交集合  $C_p^i$ ,其中  $C_p^i \in U_{FR}$  并且  $C_{con}^i \cap C_p^i \neq \emptyset$ ,计算各  $C_p^i$  之间的相似程度  $S^{ij} = S(C_p^i, C_p^j)$ ,当所有  $S^{ij}$  高于经验阈值  $\varepsilon$  时,则认为边界情况满足。两个集合之间的相似程度,主要和集合的顶点数目、平均测地距离和重心坐标有关,计算公式为

$$S(C_1, C_2) = w_{Num} S_{Num}(C_1, C_2) + w_{Geod} S_{Geod}(C_1, C_2) + \sum_{X,Y,Z} w_{cord} S_{cord}(C_1, C_2) \quad (3)$$

$$S_{Num}(C_1, C_2) = \Omega\left(\frac{Num_{C_1}}{Num_{C_2}}\right) \quad (4)$$

$$S_{Geod}(C_1, C_2) = \Omega\left(\frac{AVE\_Geod_{C_1}}{AVE\_Geod_{C_2}}\right) \quad (5)$$

$$S_{cord}(C_1, C_2) = \Omega\left(\frac{Pos_{cord \ell_1} - Min_{cord}}{Pos_{cord \ell_2} - Min_{cord}}\right) \quad (6)$$

$$\Omega\left(\frac{X}{Y}\right) = \left| \frac{X - Y}{X + Y} \right| \quad (7)$$

式中  $Num_c$  表示集合  $c$  中的顶点数目,  $Pos_{cord \ell}$  表示集合  $c$  中顶点的聚合中心,  $Min_{cord}$  对应模型网格包围盒最低点的坐标值,  $AVE\_Geod_c$  表示集合  $C$  的平均测地距离,  $w_{Num}$ 、 $w_{Geod}$ 、 $w_{cord}$  分别表示集合顶点数目、集合平均测地距离以及聚合重心的 3 轴坐标在整体相似度计算中的权重值,该权重值存储在 end 标签中的 weight 属性中。

##### 3.2.2 独立终止条件

对于头尾等单个部件,因为没有同类比较,只能利用它们与其他部件空间关联的先验知识判断终止与否。动画角色的躯干大多不具备伸缩性,即使在运动形态下,距离较近关节的空间相对位置也不会发生大的改变,利用该特性可以根据已经分割出的部分寻找邻近部件的边界, end 标签的 connect 属性就是表达了这样一种结构知识。例如:四足动物头部的分割处会最接近于前腿的分割处 MIN(level5),尾巴的分割处会最接近于后腿的分割处 MIN(level3)。以下说明此类部件在生长中遇到边界区域时的判定规则。

对该层的单个种子进行生长,检测  $U_{FR}$  中所有集合与  $C_{con}^i$  的相交情况,如有相交说明碰到边界区域,相交集合为  $C_p^i$ 。假设已分割出的相关联部件边界点集合为  $B_{part}$ ,计算  $C_p^i$  中所有点与  $B_{part}$  中所有边界点的两两测地距离,记录最小值;继续生

长,对所有遇到的边界区域计算与  $B_{part}$  的距离最小值。

由于终止条件是边界区域最靠近关联部件的分割处,因此该距离最小值一般会呈现逐渐变小趋势,逐步靠近该层正确的分割处,当该值又开始变大时,说明正在远离该层正确的分割处,因此,该值的变化最低点所代表的边界区域,即为该层正确的分割边界。

利用动画角色部件之间的结构关联,进一步刻画区域生长法的终止条件,从而在正确的分割边界停止生长是本文的第3个创新点。

### 3.3 分割边界优化

通过区域生长法提取的分割边界可能会出现锯齿状。针对边界的环状拓扑结构,在不增减网格顶点的前提下,通过在其邻近的网格区域内计算检索最短近似测地距离来优化边界。

图5给出了边界优化的过程示意图。首先,由未优化前的边界环得到与之相邻的两个边界环,共同组成一个临近网格区域(一个环带结构);然后,通过计算近似测地距离,找出这个邻近区域上距离最短的一个环;最后,以最短距离环代替原来的分割

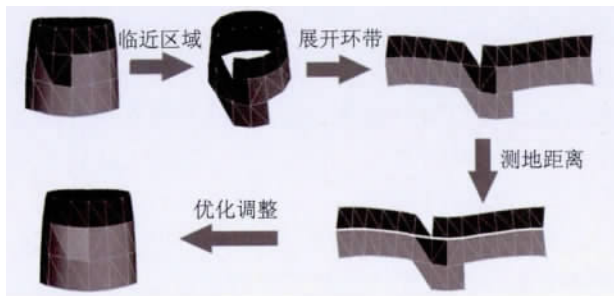


图5 边界优化示意图

Fig. 5 The schematic diagram of boundary optimization

边界,达到优化边界的目的,图6显示的是马模型膝关节边界优化前后的对比图。

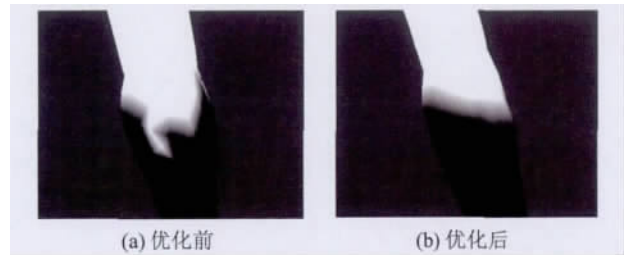


图6 马腿部边界优化前后对比图

Fig. 6 The comparison chart of before and after boundary optimization of a horse's knee

## 4 实验结果和分析

在动画角色层次结构指导下的模型分割结果,是符合期望的无冗余且包含标记信息的3维部件。关于有标记的网格分割方法最具代表性的是 Evangelos<sup>[14]</sup>的机器学习方法,该方法同样适用于动画角色。它的分割期望来源于学习过程,搜寻一类模型分割并手工标注语义信息,后期可以对同类模型实现自动化处理。本文方法没有那么全面,主要贡献在于对动画角色特征的总结并将之成功运用于意向性的分割过程中,图7分别给出了 Evangelos 和本文方法在处理四足角色模型时的分割结果,本文方法前期工作较少,结果更加细致,区分了左右肢体和主躯干,更适用于后期模型组合的工作;另一方面,游戏和影视中的动画角色一般是怪物,不断推陈出新,找到若干同类模型用来进行学习比较困难,而遵循躯干与肢体的一般性结构,对新的模型,只要对层次结构表达稍加修改即可。

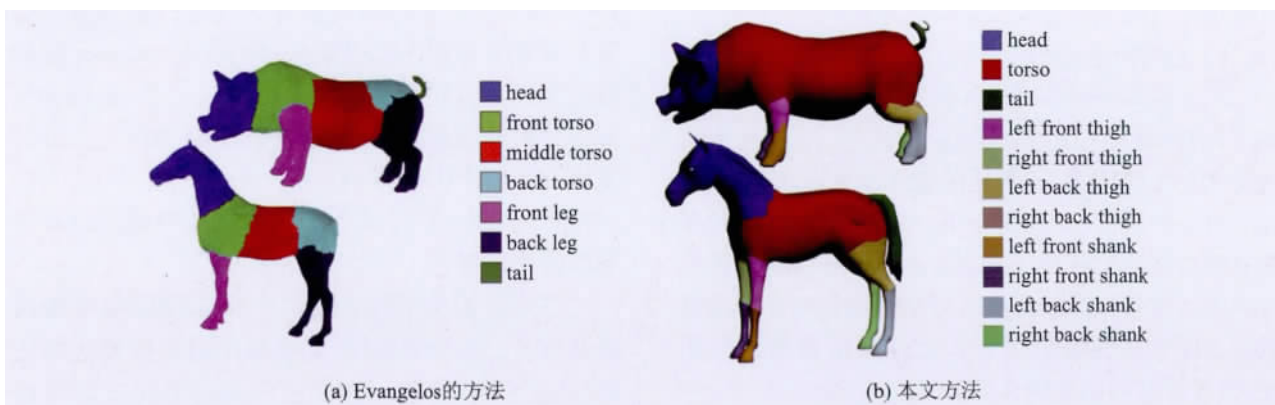


图7 本文方法和 Evangelos 方法<sup>[14]</sup>的对比图

Fig. 7 The comparison chart of our method and Evangelos' method<sup>[14]</sup>

为了进一步验证本文方法的稳定性,图8给出了同一个层次结构描述对同类四足动画角色模型的分割标记结果。我们也实施了一套层次结构描述用于两足角色模型上,和陈启华等人<sup>[17]</sup>的人体分割方法比较,结果如图9所示,文献[17]方法仅仅总结了人体模型分割与标记的规则,而本文方法扩展到了所有生物类的动画角色模型。

由于使用了测地距离作为判别条件,对于变姿态

的角色模型也可以得到很好的结果,如图10所示。图11是针对一组卡通的两足角色模型的分割,由于其四肢上下部分不那么明显,因此在描述中减少了四肢的层次;可以发现,图11中前两个动画角色含有尾巴却没有被分割,是因为在层次结构里也去掉了尾巴这一层,因此,最后归结于身体部分;同时也说明了,当一个新角色出现后,如增加了翅膀,减少了尾巴,都可以迅速地改变层次结构描述,进而获得分割结果。

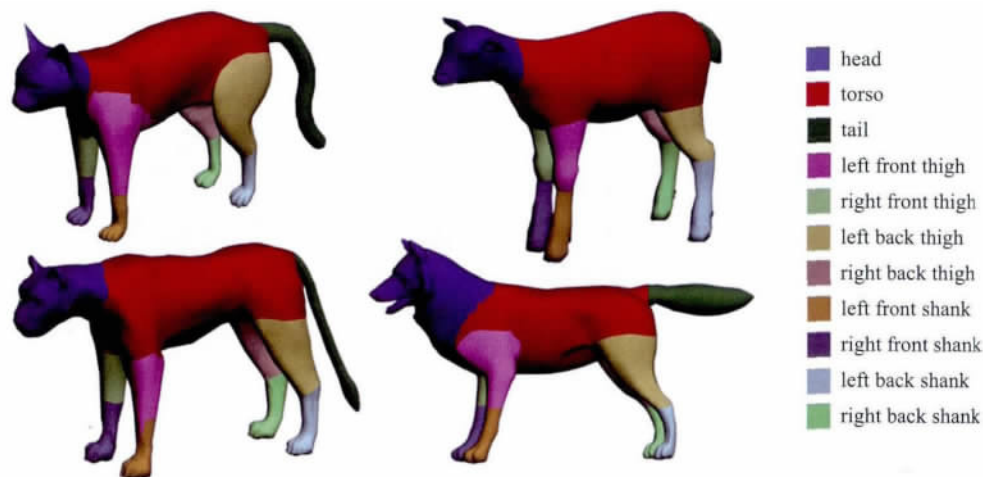


图8 本文方法在其他四足角色上的分割结果

Fig. 8 The results on some quadruped characters by our method

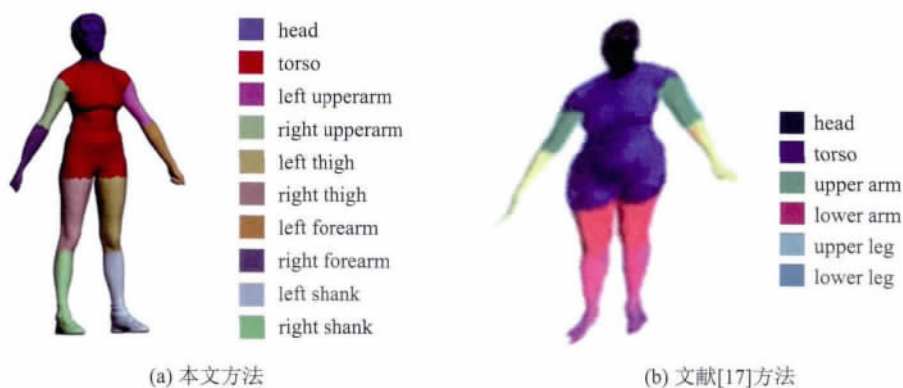


图9 本文方法与文献[17]方法对比图

Fig. 9 The comparison chart of our method and reference [17] method

以上实验结果可以表明,动画角色是一类可以总结分割特征的模型对象,可以由用户根据模型特点来定义切分的粒度与规则。相比较于传统方法仅利用几何知识的分割,更加符合用户需求且有标记信息;相比较于机器学习方法,减少了样本处理和学习的 workload,对于动画角色比较易于扩展。但同时也看到,利用一类模型对象的结构特点指导分割过

程的研究思路,不具备普适性,文献[15-16]分别利用牙齿和骨骼的空间位置关系、长度比例等已知结构指导分割的归属判断与优化,亦很难直接应用到动画角色这一对象上;本文所定义的结构描述,不仅丰富了空间位置的表达,还包括了对称性、层次性、连接性等表示,对于其他结构较为分明、拥有较多对称部件的3维模型,亦可以尝试使用。



图 10 人体的分割和标记

Fig. 10 The results on human models by our method

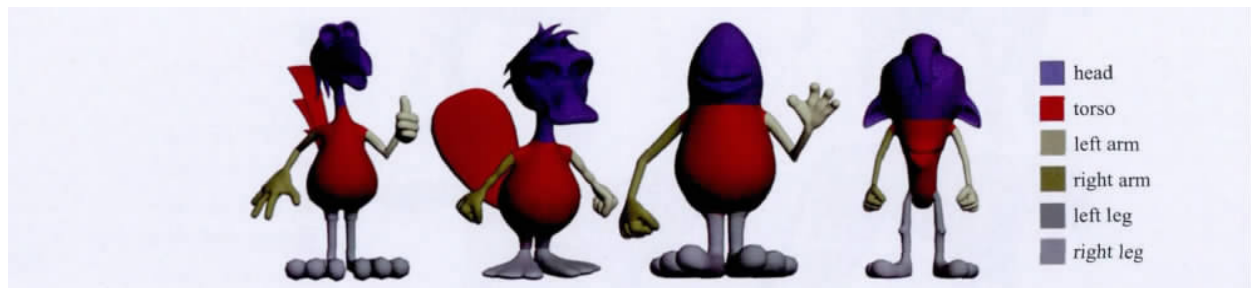


图 11 两足动画角色的分割和标记

Fig. 11 The results on some biped characters by our method

## 5 结 论

3 维模型分割和标记操作是 3 维模型检索、基于样例的 3 维建模等问题的重要前续工作,是一个热点问题,目前已经开展的工作各具特色。本文总结了动画角色的一般性结构,并总结为一套层次结构描述,通过层次化的区域生长法对动画角色进行分割和标记,降低了操作难度,提高了分割效率,且对动画角色具有一定的扩展性。

然而,该思路仍存在一些不足。层次结构一般人很难进行描述,目前是为角色设计师设计了若干标准模板,可以简单地删除与调整。复杂的类型很难通过该方式重建,下一步工作可能结合更多的网格特征作引导式定义。

本文是结构化知识支持分割方案的一次探索,仅仅面向动画角色这类 3 维模型进行了结构分析,并总结了支持分割的表达。对于世间万物的模型,知识表达将会非常复杂,虽然机器学习方法是如今解决知识传递的主流方法,但人类总结知识亦能对专业领域产生莫大的影响,也是继续研究的方向。

## 参考文献 (References)

- [1] Ariel S. A survey on mesh segmentation techniques[J]. Computer Graphics Forum, 2008, 27(6): 1539-1556. [DOI: 10.1111/j.1467-8659.2007.011103.x]
- [2] Chen X B, Aleksey G, Thomas F. A benchmark for 3D mesh segmentation [J]. ACM Transactions on Graphics, 2009, 28(3): 73-85. [DOI: 10.1145/1531326.1531379]
- [3] Vincent L, Soille P. Watersheds in digital spaces: an efficient algorithm based on immersion simulations[J]. IEEE Transactions Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1991, 13(6): 583-598. [DOI: 10.1145/1531326.1531379]
- [4] Shlafman S, Tal A, Katz S. Metamorphosis of polyhedral surfaces using decomposition [J]. Computer Graphics Forum, 2002, 21(3): 219-228. [DOI: 10.1111/1467-8659.00581]
- [5] Eck M, DeRose T, Duchamp T, et al. Multiresolution analysis of arbitrary meshes[C]// Proceedings of the 22nd Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques. New York: ACM, 1995: 173-182. [DOI: 10.1145/218380.218440]
- [6] Golovinskiy A, Funkhouser T. Randomized cuts for 3D mesh analysis[J]. ACM Transactions on Graphics, 2008, 27(5): 145-154. [DOI: 10.1145/1457515.1409098]
- [7] Ma Y Q, Li Z K, Zhao J. Consistence segmentation of triangle



- mesh using laplace spectral embedding and mean shift[J]. *Journal of Image and Graphics*, 2012, 17(10): 1292-1297. [马亚齐, 李忠科, 赵静. 基于 Laplace 谱嵌入和 Mean Shift 的三角网格一致性分割[J]. *中国图象图形学报*, 2012, 17(10): 1292-1297. ]
- [ 8 ] Lavoué G , Dupont F , Baskurt A. A new CAD mesh segmentation method, based on curvature tensor analysis[J]. *Computer-Aided Design*, 2005, 37(10): 975-987.
- [ 9 ] Han L , Gao X S , Chu B Z. Discrete curvature constrained triangle mesh model segmenting technique[J]. *Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics*, 2009, 21(6): 831-835. [韩丽, 高小山, 楚秉智. 离散曲率约束的三角网格模型拓扑分割算法[J]. *计算机辅助设计与图形学学报*, 2009, 21(6): 831-835. ]
- [10] Lévy B , Petitjean S , Ray N , et al. Least squares conformal maps for automatic texture atlas generation [J]. *ACM Transactions on Graphics*, 2002, 21(3): 362-371. [DOI: 10.1145/566654.566590]
- [11] Fan L , Meng M , Liu L. Sketch-based mesh cutting: a comparative study[J]. *Graphical Models*, 2012, 74(6): 292-301.
- [12] Au O K C , Zheng Y , Chen M , et al. Mesh segmentation with concavity-aware fields [J]. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 2012, 18(7): 1125-1134. [DOI: 10.1109/TVCG.2011.131]
- [13] Hu R L , Fan L B , Liu L G. Co-segmentation of 3D shapes via subspace clustering [J]. *Computer Graphics Forum*. Blackwell Publishing Ltd, 2012, 31(5): 1703-1713. [DOI: 10.1111/j.1467-8659.2012.03175.x]
- [14] Kalogerakis E , Hertzmann A , Singh K. Learning 3D mesh segmentation and labeling [J]. *ACM Transactions on Graphics*, 2010, 29(4): 102-114. [DOI:10.1145/1833349.1778839]
- [15] Xue J H , Ruan S , Moretti B , et al. Knowledge-based segmentation and labeling of brain structures from MRI images [J]. *Pattern Recognition Letters*, 2001, 22(3): 395-405.
- [16] Hassan S , Hétroy F , Palombi O. Ontology-guided mesh segmentation [C]// *Proceedings of FOCUS K3D Conference on Semantic 3D Media and Content*. France: [s. n. ], 2010:1-5.
- [17] Chen Q H , Pan X , Zhang S Y. 3D human landmark detection and segmentation with semantic knowledge [J]. *Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics*, 2011, 23(6): 1061-1068. [陈启华, 潘翔, 张三元. 语义知识约束的三维人体特征点检测和分割[J]. *计算机辅助设计与图形学学报*, 2011, 23(6): 1061-1068. ]
- [18] Surazhsky V , Surazhsky T , Kirsanov D , et al. Fast exact and approximate geodesics on meshes [J]. *ACM Transactions on Graphics*, 2005, 24(3): 553-560. [DOI: 10.1145/1186822.1073228]
- [19] Fang H L , Wang G J. Comparison and analysis of discrete curvatures estimation methods for triangular meshes [J]. *Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics*, 2005, 17(11): 2500-2507. [方慧兰, 王国瑾. 三角网格曲面上离散曲率估算方法的比较与分析[J]. *计算机辅助设计与图形学学报*, 2005, 17(11): 2500-2507. ]