

基于空间分割的人体模型骨骼提取算法

于瑞云¹⁾ 苏展¹⁾ 谢青¹⁾ 王俊楠²⁾

¹⁾(东北大学软件学院 沈阳 110819)

²⁾(完美世界股份有限公司 北京 100101)

摘要 当今社会,人们对于娱乐和创意的需求带动了网络与数字媒体技术的发展,而这种发展也给人们的生活带来了很大的改变.而实现骨骼的自动提取,是目前数字媒体技术研究的热点之一.本文首先通过高度函数,对模型进行处理,进行模型部位的分割,将模型分割为数个水平集,并在对水平集进行处理后对模型的拓扑结构进行分析,将模型分解为5个部位:躯干、双臂和双脚.接下来,本文使用测地距离函数对模型的各个部位分别进行处理,并基于Dijkstra算法设计算法计算并获取到这些部位的曲线骨骼,将各部分结合形成模型整体的曲线骨骼结构.最后,本文对获取到的模型的曲线骨骼进行降采样,获取模型的关节骨骼.通过骨骼点的连通性将模型关节点分类为关键关节点和非关键关节点,通过关节处的结构特征或是比例特征依次对关节点进行提取,以此求得精确度和鲁棒性较高的关节骨骼.

关键词 Collada; 三维模型; 骨骼提取; 骨骼降采样; 空间分割

中图法分类号 TP18 **DOI号** 10.11897/SP.J.1016.2019.02049

Skeleton Extraction of Character Model Based on Space Segmentation

YU Rui-Yun¹⁾ SU Zhan¹⁾ XIE Qing¹⁾ WANG Jun-Nan²⁾

¹⁾(Software College, Northeastern University, Shenyang 110819)

²⁾(Beijing Perfect World Network Technology Co., Ltd., Beijing 100101)

Abstract In today's society people's demand for entertainment and creativity has led to the development of network and digital media technology, and this development has also brought great changes to people's lives. Three-dimensional animation technology is one of these technologies. In order to enable the computer to generate realistic scenes and pictures through calculation, excellent modeling technology is necessary, and the skeleton extraction is one of the core technologies. However, the existing skeleton extraction technology is mostly artificial extraction, which consumes a lot of time and effort. Therefore, the automatic skeleton extraction technology is a research hotspot of digital media technology research at present and this paper deal with this problem. In this paper, we first use the method similar to Reeb graph algorithm, and it select the horizontal height function as the processing function to complete the segmentation of model parts. The height function is used to crosscutting the model to calculate the level set of the model. It then filters the level set. The cross section area and similar roundness are used as screening criteria. The area and similar roundness of the cross-section at different heights are calculated, and obtain the level set with high reliability after threshold selection. The topology of the model can be analyzed based on the filtered level set. Taking the height of the level set as the order, the critical

收稿日期:2018-02-19;在线出版日期:2018-11-27. 本课题得到国家自然科学基金项目(61672148,61502092)、辽宁省高校创新团队支持计划资助项目(LT2016007)、中央高校基本科研业务费专项资金项目(N171702001)、教育部-中国移动科研基金项目(MCM20160201)、辽宁省“百千万人才工程”资助项目(201514)资助. 于瑞云,博士,教授,主要研究领域为城市感知与计算、大数据智能分析、混合现实技术等. E-mail: yury@mail. neu. edu. cn. 苏展,博士研究生,主要研究方向为虚拟现实、混合现实等. 谢青,博士研究生,讲师,主要研究方向为虚拟现实、混合现实等. 王俊楠,硕士研究生,主要研究方向为虚拟现实、混合现实等.

point is obtained where the topological structure of the cross section changes, and the model is decomposed into five parts: trunk, arms and feet. The second step is to design an algorithm based on the Dijkstra algorithm to calculate and obtain the curve skeletons of the model. Because the geodesic distance function is used as Morse function to select a single starting point to obtain the level set, the result depends on the selection of starting point and the symmetry of the model. In order to improve the accuracy of the extraction results of curve skeletal structure, the geodesic distance function is used to deal with each part of the model separately, and all the parts are combined to form the whole curve skeletal structure of the model. Finally, we down-sample the curve skeletons of the obtained model to get the joint skeleton of the model. The joints of the model are classified as the key joint and the non-critical joint through the connectivity of skeleton points. For the key nodes, by analyzing the characteristics of the standard skeletal structure, the points at the appropriate height in the curved skeleton of each part are selected as the key nodes. Non-critical joints are respectively extracted through the structural features such as the circumference of the cross-section or the proportion features after the normalization of skeleton length, so as to obtain the high accuracy and robustness joints. During this process, more refined work has been done on the down-sampling step, and the robustness of the model skeleton is verified by detecting whether the skeleton line generated by the model is protruding out of the model, and the less robust skeletal lines will be modified.

Keywords Collada; 3D model; skeleton extraction; skeleton down-sampling; space segmentation

1 引 言

随着虚拟现实技术以及数字媒体技术的发展,人们对于三维角色模型动画的制作的需求也越来越多.作为多媒体技术的重要组成部分,三维动画制作的技术在近年来得到了很大的发展,但是在目前主流的三维角色制作过程当中仍然以手工制作为主,即主要采用 3DMax 或者是 Maya 等商业软件进行设计和制作,而且现阶段的动画创作产业仍面临着缺少拥有计算机动画制作相关方面知识和经验的优秀的人才资源等问题,因此在当今的三维动画的制作过程中仍然需要一定的劳动力以及花费大量的脑力.人们现在使用的较为广泛的计算机动画技术有关键帧以及动力学方法等.但是,这些方法都有一个共同的缺陷:制作耗时耗力,同时需要制作者具备较高程度的制作技巧和专业知识.

目前为了满足更多人对于三维角色动画制作的需求,需要一种简便的方式来进行三维动画的制作,因此自动进行三维人物动画制作技术已成为科研工作者或者工程师们的研究热点.在这个背景下运动重定向技术应运而生,其中模型的骨架提取以及蒙皮的绑定环节是一个重要分支,在角色动画领域发

挥着举足轻重的作用.

骨骼提取,顾名思义是从网格模型中提取出骨骼的方法.由于对单纯的网格模型添加动作的重用性和精确性都得不到保证.因此,目前一般都是先对网格模型提取骨骼,再将骨骼与网格相绑定,最后通过骨骼运动带动模型运动.

通过骨骼提取算法实现的自动骨骼提取,目前主要应用在骨骼的初步提取、大量模型的骨骼批量化提取等不需要获取极其精确骨骼的场景.在针对大量模型的骨骼提取中,如何针对模型的特征设计骨骼提取算法,使得算法的适应性更高,并且能够区分模型之间的差异,保证算法的精确性,是目前研究骨骼提取算法的重点.

基于对目前的骨架提取算法的研究,针对于目前人形模型的相关特征,本文提出了一种骨架提取方法.将模型骨骼提取分解为区域分割、曲线骨骼提取、骨骼降采样三个部分,分别求出模型的区域部分、曲线骨骼和关节骨骼,获得最终的模型骨骼结构.

2 相关工作

虚拟人作为现今虚拟现实进一步发展的主要角

色,是人类构建虚拟世界的分身.而在当前众多领域,如对象识别和匹配、虚拟导航、模型重建可视化、游戏动画 CG 制作中都有着重要的应用价值.人物模型的骨架不仅仅作为驱动模型进行运动的主要载体,同时也是对象模型外表和拓扑结构的另一种简化存储方式.由于其省去了皮肤网格结构等大量的冗余信息,可以将模型原本的形态特征很好的压缩保存.

精确的骨架信息也可以作为人物自动建模后续过程中骨骼蒙皮的重要空间参照信息,提高骨骼与模型皮肤间变形驱动建立的准确度,同时符合人体运动学规律的骨架也是运动数据加载过程中的基本要求,使得模型能够很好地契合运动提取所获得的运动数据,最大程度保留采集的原始运动的特征.所以如何从三维人体模型中提取出精确的且符合运动数据依附要求的骨架数据,是完成自动化人物建模的重要一环.

2.1 曲线骨骼的提取

骨架线是骨架提取中的一个核心的概念,针对这个概念并没有一个明确的定义,大都是利用中轴线对骨架线进行定义.

1967 年 Blum^[1]提出了中轴的概念.如图 1 所示,假定模型的轮廓为图中的虚线 C , F 为模型内部的空间,他认为模型的中轴线为轮廓 C 的最大内切圆组成的曲线,轮廓 C 的最大内切圆是指完全包含在区域 F 中的圆形,并且该圆形不能是其他圆形的真子集.图中圆的圆心为 P ,该圆与模型相切于 P_1 与 P_2 ,圆心为 P 的圆是模型的一个最大内切圆,圆心确定的曲线为 P 点所在的曲线.

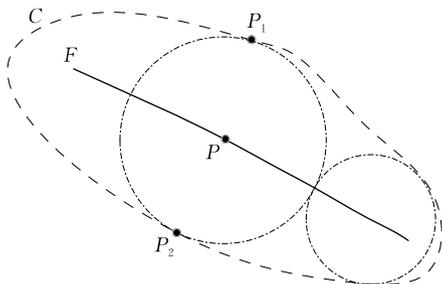


图 1 中轴概念图

曲线骨架是 3D 对象的稀疏 1D 表示,可用于许多可视化任务,包括虚拟导航,缩减模型制定,可视化改进,动画等.曲线骨骼能够在简化模型结构的同时,准确的保留 3D 模型的拓扑学结构特征^[2].曲线骨骼是由点集 $U = \{p_1, p_2, \dots, p_n\}$ 和这些点的连通关系 $C_T = \sum (p_x, p_y)$ 构成的,由于连通后形成的结

构外观类似于曲线,因此被称作为曲线骨骼^[3].

针对于三维模型的骨架提取方法已经进行很多年的研究,主要的解决方法分为以下几种方式:

(1) 基于拓扑细化的方法^[4-5].该类方法的主要思路是从模型的边缘开始,逐层次的压缩模型的表面,直至得到足够细的骨架结构.文献[5]中作者针对于网格模型提出了骨架提取的相关方法,主要的解决思路是基于网格模型的连接关系构造 Laplacian Matrix,从而对模型进行几何收缩,但该方法受到模型本身分辨率的影响,当模型分辨率过低,会影响骨架提取的结果.在此基础上文献[4]中提出了一种新的基于 AST 的骨架提取方法,该方法解决了模型分辨率低时效果不佳的问题,但是计算量比较大.

(2) 基于距离变换的方法^[6-8].这种方法是根据模型内部的点到模型表面的距离变换值,提取距离变换值的局部最大值点,利用这些点组成骨架的结构.文献[6]中,利用计算每一个体素到边界的最小值,创建了一种模型检索系统,利用该系统可以得到模型的骨架,该方法类似于中轴线的思路,这种方法的优点是能够很好地得到模型骨架的拓扑结构,但是根据中轴线的性质,骨架线的提取会受到模型表面凹凸变化的影响,因此当模型顶点数较少时或者是模型表面特征比较复杂时,利用中轴线的概念来提取骨架线时算法复杂度会比较高,而且错误率会比较高.

(3) 基于 Reeb 图的方法^[9-11].该方法一般采用一个连续函数对模型顶点或者是网格进行计算处理,将具有相同函数值的顶点聚成一个顶点,该方法的结果比较依赖于所选取的函数.

(4) 基于 Voronoi 图^[12]的方法. Voronoi 图在二维图像处理领域当中使用比较广泛,有学者将其引入到三维图形的骨架提取当中,文献[3,13]中利用 Voronoi 图来近似求得模型的中轴面,要得到骨架线需要经过剪枝处理,而且算法的复杂度也比较高.

除了这些方法之外还有基于语义分析^[14]、模型分解^[15]、广义函数^[16-17]等方法也实现了在某些情况下模型骨架提取的工作.

2.2 曲线骨骼的降采样

一个模型的曲线骨骼,其节点数经常有上百个,因此其整体看上去是一个曲线.然而,想要将骨骼应用到动作绑定中,并不需要如此多的点.因此,对曲

线骨骼进行降采样,提取出适用于骨骼绑定和运动数据加载的数量更加精简的关节点集,是从曲线骨骼提取出关节骨骼的关键之一。

降采样的概念^[18]最早出现在数位信号处理领域中,是一种多速率数字信号处理的技术或是降低信号采样率的过程,通常用于降低数据传输速率或者数据大小。在曲线骨骼的处理中,降采样的定义引申为对曲线骨骼进行处理,在减少曲线骨骼的节点数目的同时,保证关键信息不被丢失^[19]。

曲线骨骼的降采样,主要是提取出骨骼中包含重要特征的点。其中,连接点和末端点是能够反映模型特征的重要点集。对于模型曲线骨骼中的所有点,按照该节点与多少节点存在连接关系进行分类,数量为1的为末端点,2的为普通点,3以上的为连接点。以人体为例,手部末端、脚部末端、头部的关节点即为末端点,而颈关节和髋关节为连接点。可以看出,这些节点都包含重要的拓扑学信息,因此,这些点一般都会在降采样的过程中被保留。

目前一般是通过数据收集,数据分析等方式选择这些节点的位置,其中也存在经验成分,可以说目前并不是特别的成熟。除了以上的节点,为防止骨骼过长,往往在较长的骨骼上,也会添加数个关节点。关于这些关节点的添加标准和特性,并没有一个统一普适的标准。Kinect、Maya等软件都有自己的标准,而面对不同的模型类型,其标准变化也可能相当之大。

在完成曲线骨骼提取后,在不同应用场景和模型类型情况下,采样保留的关键骨架节点的具体需求也不同。文献[4-5]中,采用拓扑细化的方法逐步收敛模型网格表面,收缩至极限,表面都被集中至预期的骨架节点附近,采样取其切向领域内的中心点并连接从而获得模型骨架。该方法适用性较强,可对任意种类模型进行骨架获取,但所得骨架内节点数和拓扑结构会受模型表面结构收缩过程而影响,节点数目和拓扑结构随机且冗余节点过多。

文献[10]中提出了一种利用测地距离作为处理函数,构造得到了模型的Reeb图,该方法没有完成模型关节点的降采样提取,只完成了模型的分割后进行粗略的首尾端点获取并将其作为人物模型的四肢节点,缺少三维人物进行灵活运动所需的补充节点。

文献[6]中,基于距离变换的方法提取出的曲线骨骼受到模型表面凹凸变化的影响,当模型表面特

征比较复杂时,曲线连通性较差使得得到的骨架连通性也会比较差,需要通过计算来连接得到的骨架,才能再经采样获得关键骨骼节点。文献[3,13]中利用Voronoi图所得结果为模型中轴面,且需要经过剪枝处理,而且算法的复杂度也比较高,难以降采样至简易直线骨架结构。

3 算法描述

本方法的主要应用背景是常规情况下模型软件编辑导出标准姿势的人物模型,特别针对于拓扑结构与正常人体差距较大的模型有一定的优势。而非标准姿势的人物模型,可利用模型编辑软件常规功能快速完成初始姿势调整的预处理和导出。

本文首先对模型文件进行解析,提取出模型的网格信息。接下来,采用类似于Reeb图的方法,选定水平高度函数作为处理函数,将模型分割为5个部位。接下来,对除躯干的部位进行重新处理,采用测地函数进行处理,最终获取模型的曲线骨骼结构。

接下来,本文对模型的曲线骨骼进行降采样,提取出模型的关节骨骼。本文将关节骨骼区分为关键关节和非关键关节,其中,关键关节能够通过人体拓扑学结构(如曲线骨骼的连通量)获得;在提取出关键关节后,再对非关键关节进行提取,提取的方式是通过非关键关节所处的位置,通过数据分析等方式,获取该非关键关节到两个相邻关键关节之间的比例,以此获得非关键关节的位置。在获取所有关节点后,通过检测模型生成的骨架线是否突出模型外,验证模型骨骼的鲁棒性,并对出现该情况的区域进行位移,使得模型骨骼能够保证在网格内,从而正确的生成骨骼动画。

最后,本文将获取的所有关节骨骼的关节位置,按照骨骼拓扑形式进行整理,结合模型网格信息,生成带有关节骨骼的模型文件。

3.1 模型区域划分

该步骤中,对模型进行骨骼提取采用的是先对模型进行部位分解,后续才能分别对每个部位,根据各部位的结构特征分别进行骨骼提取。具体步骤为:首先,获取模型网格节点的数据,即网格顶点的坐标信息和所处的边信息;其次,使用高度函数对模型进行横切,计算出模型的水平集,并通过判断条件对水平集进行筛选等处理;最后,对水平集中心点进行聚类,并根据水平集的拓扑结构,将模型分解为躯干,双手,双腿5个部位。算法的伪代码如算法1所示。

算法 1. 基于高度函数切分的空间分割算法.

1. Read(File)
 2. FileLoader(File)
 3. WHILE(section < MAX) // 遍历所有截面
 4. grid = getGrid(section) // 获取该截面高度的所有网格
 5. section = getSection(grid) // 获取网格和水平面的交线
 6. levelSet = segmentSection(SectionList) // 获取水平集
 7. END WHILE
 8. criticalPoint = CalTopo(levelSets) // 获取临界点
 9. PointList = CalPart(criticalPoint, endPoint)
- // 对网格点进行部位标记

3.1.1 切割并获取水平集

以高度函数作为 Morse 函数对模型分割水平集. 从模型的底部开始至顶部结束, 每隔定长距离对模型进行一次切割, 根据模型的精度和复杂度要求, 设定模型切割次数 n_1 . 切割过程即为计算模型三角网格结构与每一高度函数构成平面 P_z 的交点. 由于模型封闭的网格结构, 统一水平集交点构成的线段会形成一个封闭的环, 即截面. 计算高度函数与水平面交点如式(1)所示:

$$\begin{aligned} x &= x_1 + (z - z_1) \times (x_2 - x_1) / (z_2 - z_1), \\ y &= y_1 + (z - z_1) \times (y_2 - y_1) / (z_2 - z_1) \end{aligned} \quad (1)$$

其中, 交点的三维空间坐标值为 (x, y, z) (交点 z 轴的值即为截面高度值), 交点所在网格的边的端点的三维空间坐标值分别为 (x_1, y_1, z_1) 和 (x_2, y_2, z_2) . P_z 表示高度为 z 的高度函数切割平面.

3.1.2 水平集的筛选

获取模型的水平集后, 需对截面进行再次筛选. 本文提出两个对截面进行筛选分类的标准, 它们分别是截面面积和截面似圆性^[20]. 计算不同高度下截面的面积和似圆性, 进行阈值筛选.

根据文献[21]中的叙述, 利用顶点坐标计算多边形面积可以由任意一点与多边形上依次两点连线构成的三角形矢量面积和求得, 似圆性和多边形面积计算如式(2)所示:

$$\begin{aligned} S(R) &= \frac{1}{2} \sum_{j=0}^n \mathbf{MR}_j \times \mathbf{MR}_{(j+1)\%n}, \\ C(R) &= \frac{4 \times \pi \times S(R)}{Pe(R)^2} \end{aligned} \quad (2)$$

其中, M 为多边形外任意一点, \mathbf{MR}_j 为点 M 与点集 R 中第 j 个点连接形成的向量, $\mathbf{MR}_{(j+1)\%n}$ 为点 M 与点集 R 的第 j 个点的下一个点连接形成的向量. 其中 $C(R)$ 表示点集 R 组成的多边形的似圆性, $S(R)$ 为点集 R 组成的多边形的面积, $Pe(R)$ 表示 R 组成的多边形的周长.

在主体模型的横截面面积相对于模型体型不会过小, 需要设定一个阈值来进行判定, 本文中面积的阈值的计算如式(3)所示:

$$T = \left[\text{Round} \left(\frac{h_{\text{model}}}{h_{\text{standard}}} \right) \right]^2 \times T_s \quad (3)$$

其中, h_{model} 为模型的高度, h_{standard} 为标准模型高度 (在本文中取为 160), $\text{Round}()$ 函数为四舍五入函数, T_s 为 160 高度下取得的面积的阈值, 本文取为 0.2. 而根据实验结果分析, 将本文中似圆性的阈值取为 0.4.

3.1.3 分析拓扑结构进行模型分解

由前文可知, 模型经过切割后, 获取了从下至上不同高度下的多个水平集. 每个水平集都是多个点的集合, 且同一水平集上点能够构成多个闭合多边形. 水平集能够构成的多边形的数目是会因其所处高度横切模型的哪些部位而有着一定的差异. 如图 2 所示, 展示了某一人体模型经获取水平集后, 在手尖高度以下, 胯部以上的某一高度的水平集点集构成的闭合多边形. 该高度下水平集只横切了模型的腰部, 故由上往下俯视该水平集只能构成一个闭合多边形.



图 2 腰部高度水平集的点集及其组成的闭合多边形

经过筛选后, 通过分析模型的水平集, 能够构成多边形的数量是对模型的拓扑结构^[22]进行分析, 并将模型分解. 以图 3 为例, 在以水平集对模型进行切割的过程中, 由下至上三个阶段, 模型的拓扑结构发生了变化, 即截面所构成的多边形数量 X 出现了变化, 则称截面发生拓扑结构变化处的点为临界点.

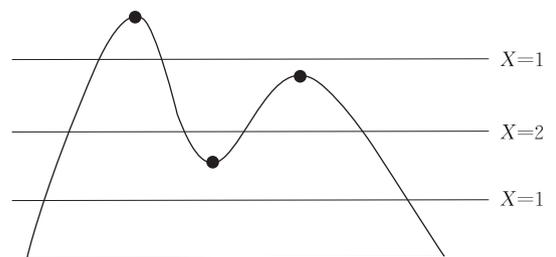


图 3 截面拓扑结构和临界点

对于一个直立的人体模型,由图 4 可以看出,即通过高度函数由下至上对模型进行切面时,通过胯下时,切面构成的闭合多边形数目由 2 个变为 1 个;通过手部末端时,闭合多边形数目变为 3 个;通过腋下时,闭合多边形数目重新变为 1 个.因此,人体模型的临界点存在于模型的胯部、手部末端和腋下.通过这些临界点,本文将模型网格节点归纳到不同的部位中.

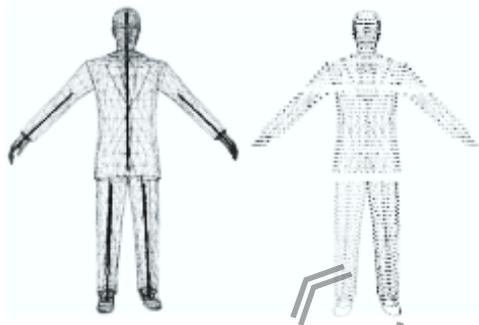


图 4 模型的拓扑结构和部位划分

进行部位划分具体步骤如下:

(1) 由下至上,遍历各高度下模型的水平集.当模型水平集数目为 2 时,将该部位水平集判断为腿部部位.

(2) 向上遍历模型水平集.此时存在两种情况:若模型的手部末端高于躯干部位最底部,则在临界点处,模型水平集数目会由 2 变为 1,此时,记录下该临界点的高度,此临界点为胯部部位;若模型的手部末端低于躯干部位,则水平集数目会出现增长(水平集数量变为 4),此时不做记录.当模型水平集数目减少 1(变为 3)时,说明此时遍历到了胯部部位的临界点,记录下该临界点的高度.

(3) 继续向上遍历模型水平集,并忽略水平集增加的情况,因为此情况是由于出现手臂部分水平集,而划分模型部位不需要获取手臂末端的位置.当再次出现水平集数目减少的状况时(水平集重新变为 1),则记录下该临界点的高度,该高度下的临界点为腋下的临界点.

(4) 标记属于模型双手部位的网格点.遍历模型网格点,将其 x 轴最大和最小的两个点定为手部的末端点.遍历与这两个网格点存在连通关系,且高度小于腋下临界点所在高度水平面的网格点,则这些网格点构成了模型双手部位的网格结构,并将它们标记.

(5) 标记属于模型双脚部位的网格点.将模型 z 轴最小,且 x 轴为正和为负的网格点定为脚部的末

端点.遍历未被标记,且与这两个网格点存在连通关系,高度小于胯部临界点所在高度水平面的网格点,则这些网格点构成了模型双腿部位的网格结构,并将它们标记.

(6) 将其余点标记为模型躯干部位的网格点,并设定头部顶点(z 轴上坐标最大的网格点)为躯干部位末端点.

3.2 曲线骨骼提取

在该步骤中,本节通过上一节中所对模型划分的 5 个部分和求得的各部分末端点,以测地函数^[23]作为 Morse 函数,分别对这五个部分进行各部分的曲线骨骼提取,并将它们相连,获得模型的曲线骨骼.传统的基于测地函数作为 Morse 函数对模型进行分割的方法为:选取一个起始点,计算模型所有点到该点的测地距离,以此划分出模型的水平集,并进行水平集的中心点提取以获得模型的曲线骨骼.然而,该方法非常依赖起始点的选择,且只以一个点作为模型的起始点,并假设模型具有完整的对称性,即模型具有前后对称性和左右对称性,且要求模型的双手和双脚应该具有相同构.否则将导致所获得的结果与实际骨骼结构的误差显著升高,出现骨骼错位等情况.基于以上测地函数存在的缺点,本文在前文的步骤中,将模型分割成了五个部分,并在本节中对各个部分分别求该部分网格点距离起始点的测地距离,保证了在模型的左右对称性被破坏的情况下,所提取出骨骼的正确性.算法步骤如下:

(1) 由于之前步骤中所确定的部分末端点与模型的网格点没有直接相连的关系,因此,首先需要将端点与网格点进行连接,形成完整的无向图结构.添加末端点与末端点高度下水平集截面中所有交点之间的连接关系(如图 5 中 Start 到 A-G 节点的连通关系).并添加交点与所切割网格线的两个端点中 z 轴值较小的网格点的连接关系(如图 5 中 A-P₁, B-P₂, C-P₃, D-P₃, E-P₄ 的连通关系).

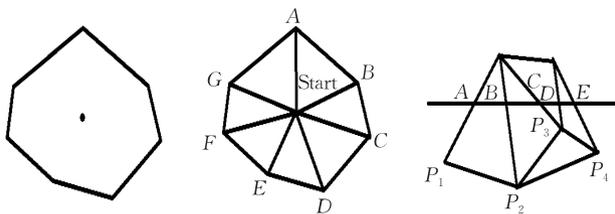


图 5 无向图补全

(2) 基于 Dijkstra 算法^[24]计算模型各部位表面所有点到末端点的测地距离.每隔定长距离设定测地距离等值面.根据模型各部分的精度和复杂度要

求, 设定模型获取测地距离等值面次数 m , 且 i 为水平集 L_i 高度序号. 以某部位为例, 获取该部位测地距离的最大值记为 G_{\max} ; 按照切割次数 m 确定每个水平集 L_i 对应的测地距离 $G_i = G_{\max} \times i/m$, 按照测地距离对该部位点进行升序排序, 并加入队列中, 从 $i=1$ 的测地等值面 L_i 开始, 将队列第一的点 V 的测地距离与测地等值面对应的测地距离 G_i 进行比较, 若 G_i 小于节点测地距离, 则 $i+1$; 若 G_i 大于测地距离, 则遍历与该点相邻且测地距离大于 G_i 的点 V' , 计算该测地等值面 L_i 与 VV' 之间的交点, 则该交点即为该测地等值面 L_i 上的一个点, 如图 6 所示.

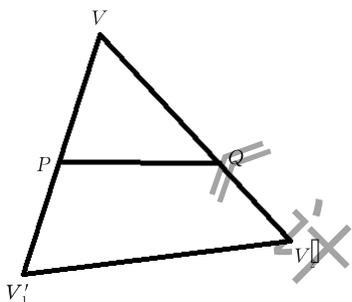


图 6 获取 Morse 等值面切割模型网格的三角面

计算测地等值面与模型网格的交点, 计算公式(4)如下所示:

$$P_{\text{cross}} = \frac{(V' - V)(G_i - G_v)}{G_{v'} - G_v} + V \quad (4)$$

其中, G_v 和 $G_{v'}$ 分别为下标所表示的网格点的测地距离. 重复以上步骤, 直到所有高度遍历完毕.

(3) 计算获得各个测地等值面交点的中心点计算公式(5)如下所示:

$$C = \sum_{t=1}^e O_t \quad (5)$$

其中, O_t 为测地等值面 L_i 上第 t 个点, 测地等值面 L_i 上点的总数为 e .

(4) 连接各部位曲线骨骼, 获得模型最终的曲线骨骼结构.

3.3 骨骼降采样

在该部分中, 本文对曲线骨骼节点的拓扑结构进行分析, 依照模型的连接数提取出能够显著反映模型拓扑特征的关键节点; 之后, 通过归一化位置分析, 提取出其余的关节点; 最后, 算法对模型关节点的合理性进行分析, 判断骨骼是否处于模型内部, 对于不合理的关节点, 算法在区间内选取合理且位置接近的点作为替代.

3.3.1 关节点的划分和获取

从标准骨骼结构上可以看出, 对曲线骨骼所划

分的各个部位分别包含以下节点:

躯干: 头部关节、颈关节、胸腔关节、髌关节;

臂部: 肩关节、肘关节、腕关节、手部关节;

腿部: 腿关节、膝关节、踝关节、脚部关节.

(1) 首先, 对关键节点进行提取. 本文中, 将连接点数目不为 2 的关节点(即末端关节点和接合关节点)称作关键节点. 按照其在骨架拓扑结构中的作用又分为末端关节点和接合关节点, 即模型骨骼部位的划分依赖于末端关节点和接合关节点. 而所有普通关节点都在特定的两个末端关节点和接合关节点之间, 如颈关节在头部关节(末端点)和胸腔关节(接合点)之间, 即通过关键节点的位置, 能够更便捷地求出非关键节点的位置.

对关键节点中的末端关节点进行匹配的方式为: 对于双手部分的曲线骨骼, 将每个部分中 z 轴值最小, 即最靠下的点, 作为手部关节点; 对于躯干部分的曲线骨骼, 将 z 轴值最大, 即最靠上的点, 作为头部关节点; 对于双腿部分的曲线骨骼, 将 z 轴值最小, 即最靠下的点, 作为脚部关节点.

对关键节点中的接合关节点进行匹配的方式为: 对于标准骨骼来说, 接合关节点有胸腔关节和髌关节. 髌关节的求取较为容易, 因为本文的模型分割, 实际上成为了躯干部分 z 轴值较低的末端点, 因此, 将该点位置作为髌关节的位置. 对于胸腔关节的提取, 首先获取双手部分曲线骨骼中 z 轴值最大的点, 即手部上端末端点, 获取躯干部分对应 z 轴高度的曲线骨骼节点, 并以该节点作为胸腔关节点的位置.

(2) 对部分非关键节点进行提取. 其中, 部分关节点可以通过关节点部位的人体特征或模型划分部分获取, 因此优先对这些关节点进行提取:

肩关节和腿关节的位置实际为模型分割后双手和双脚部分的上端末端点, 因此以该位置的坐标作为模型肩关节和腿关节的坐标.

腕关节为模型手和臂的连接点, 对于人体模型来说, 该部分处的模型网格结构相比其余部分更“细”, 表现为该部分截面的面积、周长或似圆性有着显著变化. 对于测地函数提取的截面来说, 同一截面上的所有点未必在空间上构成同一平面, 因此无法测出截面的面积. 所以, 本文采用截面上所有联通点构成封闭连通关系的周长, 作为判断腕部关节位置的依据. 如图 7 所示, 为一个模型手部截面的周长变化图. 其中, 对于一个截面中有多个封闭连通关系的情况, 取这些连通关系中围成封闭多边形周长的最大值.

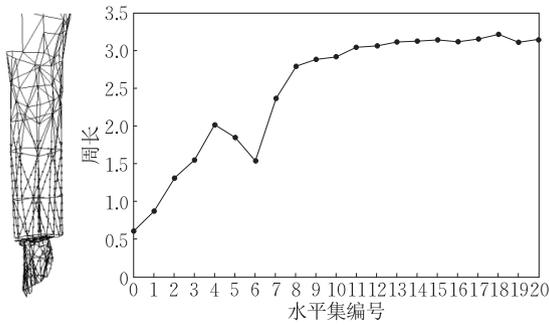


图7 模型手臂与测地距离截面周长

踝关节为脚部与腿部的连接点,该点与腕关节具有类似的特征,因此,采用与腕关节类似的方法,由下至上检测模型的截面周长,找出周长发生明显变化且取得邻域内极小值的点,作为踝关节的位置。同理,颈关节的位置可以通过相似的方法求出。

(3)最后,对其余的非关键关节点进行提取。对于这些关节点,不采取人体特征来进行求解的主要原因:动漫人物模型经常有一定的夸张和强调处理,在很多动漫人物模型中,手部和腿部的网格结构和正常人体有着较大的区别;且由于修改这些关节点的位置不会影响关键关节点,因此对于非关键关节点的误差容忍度相较于关键关节点会更高。

因此,本文通过归一化骨骼长度,分析该关节处于该段骨骼的位置比例对这些关节点进行提取。首先,求出标准骨架的归一化骨骼长度,求取公式如式(6)所示。

$$N(s) = \frac{\sum_{k=1}^{\alpha} l_k(s)}{\alpha} \quad (6)$$

其中, $N(s)$ 为关节点 s 的归一化骨骼长度, $l(s)$ 为关节点 s 到其相邻末端点的骨骼长度, $l(b)$ 为关节点 s 所处位置骨骼的长度, α 为标准骨架的个数。通过分析多个以标准骨架为基准的模型,求出肘关节和膝关节的归一化骨骼长度 $N(s_{\text{elbow}})$ 和 $N(s_{\text{ankle}})$ 。

求出 $N(s_{\text{elbow}})$ 和 $N(s_{\text{ankle}})$ 后,即可依照该比例关系求出所求骨骼的膝关节与肘关节的位置坐标。以膝关节为例,与膝关节所相邻的末端点为脚部关节,骨骼长度 $l(b)$ 为腿部关节到脚部关节的长度。

针对外附衣物导致模型外层呈现与标准人物模型区域特征差异较大的模型,使得四肢区域与主体区域之间划分错误,从而产生误差。在进行模型骨骼节点降采样时需要进行稍微的手动辅助从而获得正确的节点。渲染出模型正面图像,手动粗略标定出人物各主要部位关节点高度。如该模型下身部位有延长的遮挡如裙子或过膝的风衣,影响的是腿部和躯

干之间交界区域的划分,可通过渲染模型后通过视觉手动粗略定义髋关节的高度位置,取曲线骨骼上最接近该高度的点作为髋关节的位置。同时拟合腿部曲线骨骼的延长直线,取与髋关节相同高度平面的交点作为腿关节的坐标。臂部与躯干部交界处胸腔关节和肩关节可通过相似方法获得。

3.3.2 嵌入细化

获取膝关节和肘关节的关节点后,对该关节位置进行检查,防止其出现图8的骨骼突出情况。



图8 骨骼突出模型的情况和正确情况

骨骼突出模型的一个显著特征就是两个关节点构成的骨架线与三角网格存在相交情况。因此,本文首先通过遍历关节点所处位置的三角网格,逐一判断与骨架线是否相交。判断的步骤如下:

(1)首先,判断骨架线的两个端点是否在三角形的同侧。通过公式(7),可以计算线段的两个端点到平面的距离。其中 \mathbf{n} 为平面的法向量, d 为平面到原点的距离, $Dis(\mathbf{P})$ 为点到该平面的距离, \mathbf{P} 为原点到空间中点的向量。如果两个端点到平面距离都为正或都为负,则说明线段的两个端点位于三角网格的同侧,这种情况下一定不存在交点。若两个端点到平面的距离正负相异,则说明三角网格所处平面与骨架线存在交点。

$$Dis(\mathbf{P}) = \mathbf{n} \cdot \mathbf{P} - d \quad (7)$$

(2)若三角网格所处平面与骨架线存在交点,则判断其交点是否落在三角网格面内。首先通过公式(8)求出骨架线与三角网格所处平面的交点。

$$\mathbf{Pc} = \mathbf{P}_3 + \beta \mathbf{P}_{34},$$

$$\beta = \frac{a(x_4 - x_3) + b(y_4 - y_3) + c(z_4 - z_3)}{ax_3 + by_3 + cz_3 + d} \quad (8)$$

其中, \mathbf{Pc} 为原点到线段与平面交点 Pc 的向量, \mathbf{P}_3 为原点到线段的其中一个端点 P_3 的向量, \mathbf{P}_4 为原点到线段的另一端点 P_4 的向量, \mathbf{P}_{34} 为线段的两个端点 P_3 、 P_4 构成的向量,平面以 $ax + by + cz + d = 0$ 表示, P_3 的坐标为 (x_3, y_3, z_3) , P_4 的坐标为 (x_4, y_4, z_4) 。

(3)若交点的任一坐标值大于模型网格最大坐标值或小于最小坐标值,则说明交点一定落于三角网格外,将其直接舍弃。否则,计算交点是否在三角网格之内。判断交点是否落在三角网格内的公式如式(9)所示:

$$u = \frac{(v_1 \cdot v_1)(v_2 \cdot v_0) - (v_1 \cdot v_0)(v_2 \cdot v_1)}{(v_0 \cdot v_0)(v_1 \cdot v_1) - (v_0 \cdot v_1)(v_1 \cdot v_0)},$$

$$v = \frac{(v_0 \cdot v_0)(v_2 \cdot v_1) - (v_0 \cdot v_1)(v_2 \cdot v_0)}{(v_0 \cdot v_0)(v_1 \cdot v_1) - (v_0 \cdot v_1)(v_1 \cdot v_0)} \quad (9)$$

假设三角网格的三个顶点分别为 A, B, C , 交点为 P_c , 则 $v_0 = C - A$, $v_1 = B - A$, $v_2 = P_c - A$. 当满足式(10)的条件时, 交点在三角网格内.

$$u \geq 0, v \geq 0, u + v \leq 1 \quad (10)$$

若交点在三角网格内, 则在曲线骨骼上选择其相邻的节点, 重复进行判断处理, 直到骨骼线与网格模型不存在相交为止.

4 实验结果与分析

4.1 实验环境

实验的硬件环境: CPU 为 Intel(R) Core(TM) i5-3230M CPU @ 2.60 GHz, 内存为 8 GB, 显卡为 NVIDIA GeForce GT 750 M 的 PC 机. 同时, 根据该算法所生成带有关节骨骼的模型, 设计了一个模型骨骼提取和动画生成的系统, 使得模型骨骼提取的结果可视化和方便手动辅助节点高度标定.

为了展示整个算法过程中各步骤中的处理效果, 本文主要选择了从简到繁四种人形模型作为实验初步的测试模型集, 如图 9 所示. 测试集所包含的四个测试模型的顶点以及网格三角面的信息如表 1

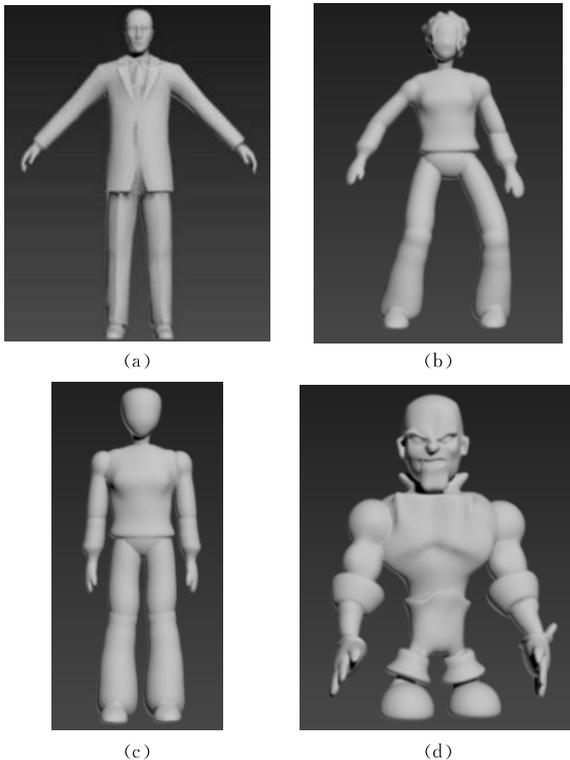


图 9 实验测试模型集

所示, 综合考虑模型顶点、网格复杂度及皮肤趋势复杂度, 分为(a, bc, d)三个等级, 方便于测试本文算法对于不同复杂度等级的骨骼提取效果.

表 1 实验测试模型顶点及网格复杂度

模型编号	顶点个数	多边形个数
a	2541	5078
b	13 336	26 668
c	13 336	26 668
d	13 336	26 668

依照模型本身的特征作为比较标准, 测试集的前三个人形模型的各部分的长度比例与现实正常人体的躯体比例类似. 为了显示出本文算法对于与正常人体比例差距较大的卡通类人形模型的骨骼提取效果, 选取了模型 d 加入测试集, 并且该模型的顶点及网格复杂度最高. 同时为了展示出将模型先行分割成五个部分后分别提取其曲线骨骼的效果与直接进行整体提取曲线骨骼的对比效果, 选取左右不对称的模型 b 和 d 加入模型测试集.

4.2 区域划分结果分析

经过本文算法的模型区域划分处理后, 模型集处理结果如图 10 所示. 高度函数作为 Morse 函数将每一个测试模型分割成等高度差的水平集, 且左臂、右臂、左腿部、右腿部及主身躯部分分别用五种颜色进行区分. 从图 10 中可以看出, 无论是从低到高的复杂度的模型都可以从胯部部位及腋下部位临界点处很好地将模型分为五个躯体部分. 且模型切割获得环装水平集效果较好, 复杂度越高的模型, 其每个定高水平集包含的交点越多, 其模型切割效果

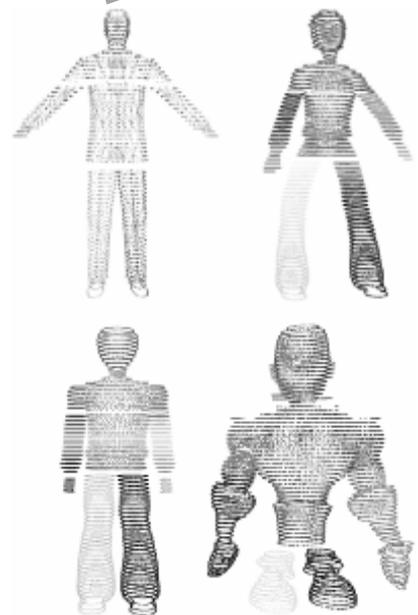


图 10 模型区域分割结果

的颜色也越深. 本文实验中, 测试模型高度近似, 故统一其以高度函数作为 Morse 函数对模型切割次数设定为 $n_1 = 100$.

4.3 曲线骨骼提取结果分析

由于基于 Voronoi 图^[3,13]的方法在进行初步骨架节点近似位置提取时结果为模型的中轴面, 与本文通过提取模型各部分骨架曲线的处理方法无比较性. 故本文方法在曲线骨骼提取阶段只与基于 Reeb 图的方法^[10]、基于拓扑细化的方法^[4]、基于距离变换的方法^[6]进行实验对比.

本文采用图 9 中的测试模型集对曲线骨骼进行提取, 提取结果如图 11 所示. 针对不同等级复杂度的测试模型, 获取模型划分区域各部分测地距离等高水平集的中心点集, 并将其展示于模型封闭空间内. 可以看出, 每个测试模型的五个主要区域都可以获得较为密集的中心点拟合曲线, 且曲线趋势可以很好地反映出外部模型网格形状变化趋势.

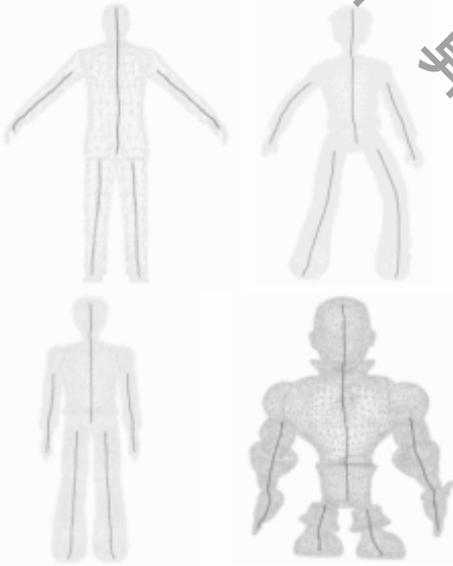


图 11 曲线骨骼提取结果

为了显示出将模型分割为五个区域后进行曲线骨骼提取的效果, 表 2 中的记录结果展示了本文基于空间分割算法和整体模型进行基于 Reeb 图方法^[10]、基于拓扑细化的方法^[4]、基于距离变换的方法^[6]求得的曲线骨骼的中心性数据.

表 2 曲线骨骼中心性误差对比

模型编号	空间分割法/%	Reeb 图法/%	距离变换法/%	拓扑细化法/%
a	2.56	2.12	2.63	2.74
b	2.84	3.09	3.34	3.56
c	3.02	3.11	3.50	3.52
d	4.01	12.92	9.24	5.82

可以看出以提取的曲线骨骼中心性为基准, 当模型的细节与人体模型区别较大时, 基于空间分割方式所提取的曲线骨骼结果要优于 Reeb 图和距离变换方法的曲线骨骼. 这是因为基于空间分割的方式将模型分成了 5 个部分进行分别求取, 有效地保持了模型的对称性, 并以此提高了提取结果的准确性.

本文针对于以上四个模型的计算时间花费的对比如表 3 所示.

表 3 算法时间对比

模型编号	空间分割法/s	Reeb 图法/s	距离变换法/s	拓扑细化法/s
a	0.455	0.545	3.015	2.142
b	1.792	1.582	4.992	5.223
c	1.352	1.416	5.076	5.411
d	2.619	2.372	6.612	6.182

区域划分和曲线骨骼的提取是决定模型骨架提取时间复杂度的主要步骤, 而其中主要影响时间复杂度的过程是获取切割点, 切割点的划分、水平集划分、获取等值面交点以及交点划分五个过程. 本文的算法在这五个过程中的时间复杂度如表 4 所示. 利用距离变换的方法对于模型像素点数为 $x \times y \times z$ 的模型, 根据文献^[6]其时间复杂度为 $O(xyz)$. 通过对比可以看出, 本文的算法在时间花费上要远小于距离变换法小很多. 而拓扑细化的方法^[4]需要进行逐步多次迭代收缩, 逐层次的压缩模型, 算法复杂度较高, 计算量较大. 根据算法复杂度的对比, 可以看出本文算法在时间复杂度上要优于距离变换法和拓扑细化的方法. 当模型网格变得较为复杂时, 距离变换法时间花费会增加. 因此针对于 d 模型, 本文的基于空间分割的方法效率就会比距离变换法和拓扑细化法高很多.

表 4 时间复杂度表

操作	时间复杂度	说明
获取切割点	$O(n)$	n 为三角面个数
切割点划分	$100 \times O(n!)$	n 为每一个高度下切割得到的线段数
水平集归属区域判断	$4 \times O(n)$	n 为水平集多边形个数
获取等值面交点	$O(n)$	n 为三角面个数
交点划分	$m \times O(n!)$	n 为每一个等值面得到的线段数, m 为等值面总数

4.4 骨骼降采样结果分析

由于基于 Voronoi 图^[3,13]的方法在进行初步骨架节点近似位置提取时结果为模型的中轴面, 无法满足降采样至简易直线骨架结构. 且基于拓扑细化的方法^[4]在从曲线骨骼转化至简易直线骨骼的过程

中,是逐步收敛模型网格表面,收缩至极限,表面都被集中至预期的骨架节点附近,采样取其切向领域内的中心点并连接从而获得模型骨架.该方法虽然适用性较强,可对任意包括人物模型外其他非人物模型进行骨骼提取.但另一方面所得骨架内节点数和拓扑结构会很大程度受模型表面结构收缩过程而具有非常大的不定性,造成节点数目和拓扑结构随机且错误的冗余节点过多,无法与标准拓扑结构下的骨架进行对应性的误差分析.故本文方法在骨骼降采样提取阶段只与基于 Reeb 图的方法^[10]和基于距离变换的方法^[6]进行实验对比.

对图 9 中的四个模型的曲线骨骼经过曲线骨骼降采样之后所获得的结果如图 12 所示.从图中可以看出,从曲线骨骼提取步骤中获得的曲线骨骼点集中可以很好地提取出标准骨架拓扑结构所需的骨骼关节点.组成符合动画运动数据需求的骨架树且能够很好地嵌入到模型封闭空间中.且经过嵌入细化步骤的处理,未出现有将骨骼节点连线后,连接线段部分暴露于模型封闭空间外的骨骼突出情况出现.

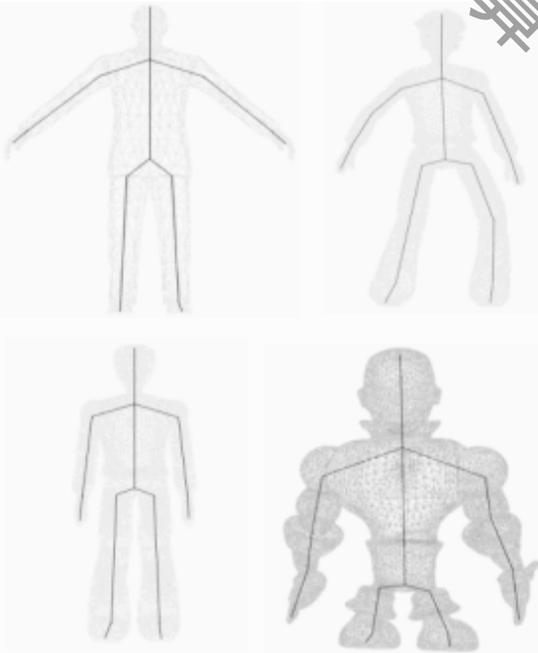


图 12 实验提取骨架树并嵌入模型结果

表 5 展示了本文算法所提取出的关节骨骼和基于距离变换算法以及基于 Reeb 图的方法提取出的关节骨骼与模型基准骨骼之间的空间位置误差的对比数据.空间位置误差的计算方法为所有模型关节点到标准骨骼关节点的偏移量与模型包围盒对角线偏移量的比值.可以看出本文算法所提取出的骨骼节点空间位置相对于其余两种方法的空间位置误差更低,效果更好.

表 5 关节空间位置误差比较

模型编号	本文方法/%	Reeb 图法/%	距离变换法/%
a	1.66	2.42	2.08
b	3.26	5.66	3.67
c	3.85	4.35	5.21
d	5.93	10.23	9.70

表 6 展示了本文算法所提取出模型手臂部关节骨骼和基于距离变换法以及基于 Reeb 图的方法提取出的关节骨骼与模型基准骨骼之间的长度误差的对比,对比依据是模型部位的骨骼长度与标准骨骼长度误差的比值数据.

表 6 关节长度误差比较

模型编号	本文方法/%	Reeb 图法/%	距离变换法/%
a	4.29	4.42	8.23
b	3.99	6.72	6.20
c	6.21	7.29	-6.55
d	-3.80	-6.92	-5.42

根据结果可以看出,本文所提取的关节骨骼在长度误差上较距离变换法小,而与基于 Reeb 图方法误差对比中,可以发现对称性较好的模型 a 与 b,两者误差相近,而对对称性较差的模型 c 和 d,由于基于 Reeb 图方法是先对整体模型进行曲线骨骼提取而后截取肢体端点,而本文算法将模型分成了 5 个部分进行分别求取,有效地保持了单独模型肢体部分的对称性,降低了误差.且当模型的形状与人体标准体型相差较大时,依旧能够保持较低的误差值.

将本文的方法应用测试于多组包含不同大小和种类的人物模型测试集,并将骨架处于模型中的空间位置作为重要参数进行骨骼驱动的蒙皮,而后将不同组复杂运动数据重定向至提取出的骨架上,如图 13、图 14、图 15 所示.

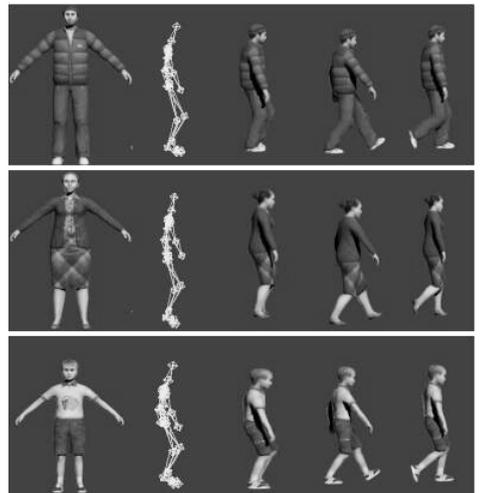


图 13 提取骨架、蒙皮并添加行走运动效果测试集

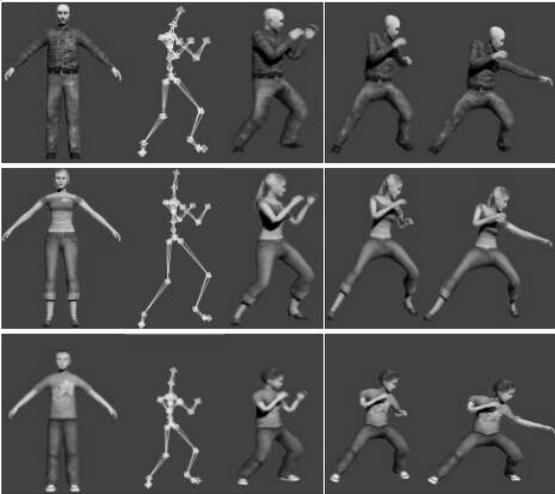


图 14 提取骨架、蒙皮并添加出拳运动效果测试集

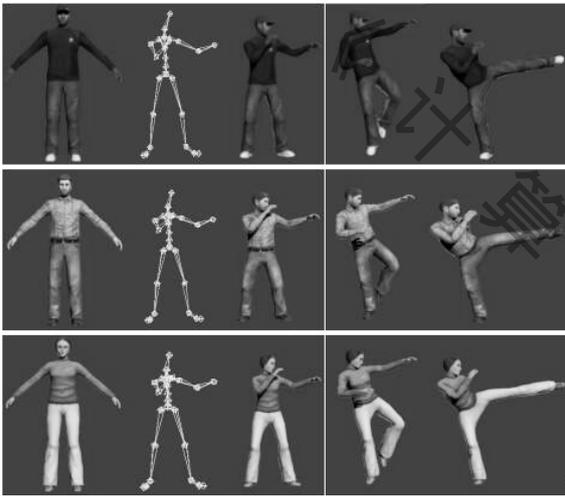


图 15 提取骨架、蒙皮并添加高踢腿运动效果测试集

从测试结果可以看出,提取出的骨架可以很好地应用于模型蒙皮并且可以很好地满足人物正常运动的需求。

5 总结与展望

本文在现有的骨骼提取方面被广泛应用的几种算法基础上提出了一种针对于人物模型,即整体结构类似于人形但细节差异较大的人形模型的骨骼提取算法.对该算法做出了实现,并以该算法为内核实现了一个骨骼提取的交互系统.实验证明,通过该算法所最终获得的关节骨骼相对于传统算法,其准确性和提取效率有着一定的提高。

但是本算法还有一些需要改进的地方.如对于模型较为复杂、区域划分结构发生改变的情况所计算出的结果不甚理想,在进行关键节点取样时需进行手动辅助标定高度.这将是进一步的研究中改进的方向。

参 考 文 献

- [1] Blum H. Biological shape and visual science (Part I). *Journal of Theoretical Biology*, 1973, 38(2): 205-287
- [2] Chen M, Ebert D, Hagen H, et al. Data, information, and knowledge in visualization. *IEEE Computer Graphics and Applications*, 2009, 29(1): 12-19
- [3] Dey T K, et al. Approximating the medial axis from the Voronoi diagram with a convergence guarantee. *Algorithmica*, 2001, 38(1): 179-200
- [4] He Zhi-Ying, Liang Xiao-Hui, Zhao Qin-Ping. Skeleton extraction approach based on the attributes of surface and tangency for point models. *Journal of Computer Research and Development*, 2012, 49(7): 1377-1387(in Chinese)
(何志莹, 梁晓辉, 赵沁平. 基于表面及切向属性的点模型骨架提取方法. *计算机研究与发展*, 2012, 49(7): 1377-1387)
- [5] Au K C, Tai C L, Chu H K, et al. Skeleton extraction by mesh contraction. *ACM Transactions on Graphics*, 2008, 27(3): 1-10
- [6] Sundar H, Silver D, Gagvani N, et al. Skeleton based shape matching and retrieval//*Proceedings of the 2003 Shape Modeling International*. Seoul, South Korea, 2003: 130-139
- [7] Liu W, Jiang H, Bai X, et al. Distance transform-based skeleton extraction and its application in sensor network. *IEEE Transactions on Parallel and Distributed System*, 2013, 24(9): 1763-1772
- [8] Wu J, Duan H, Zhong Q. 3D image skeleton algorithms//*Proceedings of the 2011 IEEE International Conference on Anti-Counterfeiting, Security and Identification*, Xiamen, China, 2011: 97-100
- [9] Werghi N, Xiao Y, Siebert J P. A functional-based segmentation of human body scans in arbitrary postures. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part B: Cybernetics*, 2006, 36(1): 153-165
- [10] Yu Yong, Wang Zhao-Qi, Xia Shi-Hong, et al. Pose-independent joint extraction from scanned human body. *Journal of Computer Research and Development*, 2008, 45(7): 1249-1258(in Chinese)
(于勇, 王兆其, 夏时洪等. 一种姿态无关的人体模型骨骼提取方法. *计算机研究与发展*, 2008, 45(7): 1249-1258)
- [11] Xiao Y, Siebert P, Werghi N. A discrete Reeb graph approach for the segmentation of human body scans//*Proceedings of the 4th International Conference on 3D Digital Imaging and Modeling*. Banff, Canada, 2003: 378-385
- [12] Pellerin J, Lévy B, Caumon G, et al. Automatic surface remeshing of 3D structural models at specified resolution: A method based on Voronoi diagrams. *Computers & Geosciences*, 2014, 62(2): 103-116
- [13] Amenta N, Choi S, Kolluri R K. The power crust//*Proceedings of the ACM Symposium on Solid Modeling*. Michigan, USA, 2001: 249-266

- [14] Hu Xiaoyan, Liang Xiaohui, Zhao Qingping. Match the virtual human model and motion data automatically. *Journal of Software*, 2006, 17(10): 2018-2191
- [15] Lien Jyh-Ming, Amato N M. Simultaneous shape decomposition and skeletonization using approximate convex decomposition. Parasol Laboratory, Department of Computer Science, Texas A & M University: Technical Report, TR05-015, 2005
- [16] Chuang J H, Tsai C H, Ko M C. Skeletonization of three dimensional object using generalized potential field. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2000, 22(11): 1241-1251
- [17] Cornea N D, Silver D, Yuan X, et al. Computing hierarchical curve skeletons of 3D objects. *The Visual Computer*, 2005, 21(11): 945-955
- [18] Dreger D S, Huang M H, Rodgers A, et al. Kinematic finite-source model for the 24 August 2014 South Napa, California, Earthquake from joint inversion of seismic, GPS, and InSAR data. *Seismological Research Letters*, 2015, 86(2A): 327-334
- [19] Madaras M, Đuriković R, Ágošton T, et al. Skeleton extraction from a mesh for easy skinning animation// *Proceedings of the 13th International Conference on Humans and Computers*. Aizu-Wakamatsu, Japan, 2010: 37-41
- [20] Yi G, Kim N H. Identifying Boundaries of Topology Optimization Results Using Basic Parametric Features. New York, USA: Springer-Verlag, 2017
- [21] O'Rourke J. *Computational Geometry in C (2nd Edition)*. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 1994
- [22] Munkres J. Introduction to topology. *American Mathematical Monthly*, 2017, 14(310): 1-6
- [23] Schwarz L A, Mkhitarayan A, Mateus D, et al. Human skeleton tracking from depth data using geodesic distances and optical flow. *Image and Vision Computing*, 2012, 30(3): 217-226
- [24] Broumi S, Bakal A, Talea M, et al. Applying Dijkstra algorithm for solving neutrosophic shortest path problem// *Proceedings of the International Conference on Advanced Mechatronic Systems*. Melbourne, Australia, 2017: 412-416



YU Rui-Yun, Ph. D. professor. His research interests include urban sensing and computing, big data intelligence, mixed reality technologies, etc.

SU Zhan, Ph. D. candidate. His research interests include virtual reality, mixed reality, etc.

XIE Qing, Ph. D. candidate. Her research interests include virtual reality, mixed reality, etc.

WANG Jun-Nan, M. S. candidate. His research interests include virtual reality, mixed reality, etc.

Background

In the process of constructing the model, the automatic extraction of skeletal structure is one of the important steps to influence the movement effect of the model. At present, the automatic methods for extracting the skeleton include refine the topology method, method based on geometry contraction, transformation of distance, Voronoi method and Reeb diagram. If the model has fewer vertices or complex surface features, the complexity and error rates of these methods are high. The skeleton connectivity is also poor, and it needs to be modified manually according to the application scenario. These algorithms are mainly used in the scene that does not need to obtain extremely accurate, such as the initial extraction or quantitative extraction of skeleton. When dealing with the same type of model, how to design a better and more accurate skeletal extraction algorithm is the key point of 3D character modeling.

In this paper, a skeleton extraction algorithm named Skeleton Extraction Based on Level Set Curve Center Clustering is proposed. First, the height function is used to deal with the model. The model is divided into several level sets, and the topological structure of the model is analyzed after filtering of the level sets. The final model is decomposed into five parts; trunk, arms and feet. Next, this paper uses the geodesic distance function to treat each part of the model

separately. Based on the Dijkstra algorithm, a method is designed to calculate and obtain the curve skeleton of these parts. And each part is combined to form the curve skeleton structure of the whole model. Finally, the curve skeletons are processing by down-sampling to get the joints of the model.

This work is supported by the National Natural Science Foundation of China (61672148, 61502092), the Fundamental Research Funds for the Central Universities (N171702001), the Program for Liaoning Innovative Research Term in University (LT2016007), the Ministry of Education—China Mobile Research Fund (MCM20160201), and the Liaoning BaiQianWan Talents Program (201514).

One of main tasks of the abovementioned project is to provide related skeleton services for 3D character modeling. Based on the existing skeleton extraction algorithm, this paper proposes a skeleton extraction algorithm for the cartoon character model, which is similar to the human form but with a large difference in detail. Since the model is divided into five parts based on spatial segmentation, the symmetry of the model is maintained effectively, and the accuracy of extracting results is improved. The accuracy of the joints of the whole model obtained by this algorithm is better than that of traditional algorithm.