

三维模型骨架的矫正*

朱红斌^{1,3+}, 王文成¹, 吴恩华^{1,2}

¹(中国科学院 软件研究所 计算机科学重点实验室,北京 100080)

²(澳门大学 科学技术学院 电脑与资讯科学系,澳门)

³(中国科学院 研究生院,北京 100039)

Rectifying the Skeleton of 3D Models

ZHU Hong-Bin^{1,3+}, WANG Wen-Cheng¹, WU En-Hua^{1,2}

1(Key Lab of Computer Science, Institute of Software, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China)

2(Department of Computer and Information Science, Faculty of Science and Technology University of Macao, Macao, China)

3(Graduate School of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

+ Corresponding author: Phn: +86-10-62522028, Fax: +86-10-62522028, E-mail: zhuhb@ios.ac.cn, <http://www.ios.ac.cn>

Received 2004-04-05; Accepted 2004-07-05

Zhu HB, Wang WC, Wu EH. Rectifying the skeleton of 3D models. *Journal of Software*, 2004,15(Suppl.): 206~214.

Abstract: In extracting the skeleton from the 3D complex model, the existing methods may produce errors that some branches are away from the center positions and some branches are redundant. As for this, a rectification method is proposed in this paper to correct these errors. After a coarse skeleton is extracted based on the distance field of the 3D model, the method investigates every joint to see whether it is away from its local center position. The investigation work by omitting radial rays evenly with the joint as the starting point to intersect the model's surfaces and studying the length distribution of the segments from the joint to the intersection points along the rays. For the joints away from the center positions, they are moved to the center and their related branches are also modified. Thus, the skeleton can be rectified automatically. Experimental results show the new method can efficiently rectify the skeleton and run fast, and generally the time for rectification takes up less than 2% of the time for extracting the skeleton.

Key words: rectify; skeleton; the distance field; 3D model

摘要: 对复杂的三维模型进行骨架提取时,目前用各种骨架提取方法得到的骨架均可能产生偏离中心位置和冗余分支的失误情况.为此,提出一种骨架矫正方法,以改正骨架中的这些质量问题.在基于距离场提取骨架后,该方法

* Supported by the National Natural Science Foundation of China under Grant Nos.60373051, 60173022, 60033010 (国家自然科学基金); the National Grand Fundamental Research 973 Program of China under Grant No.2002CB312102 (国家重点基础研究发展规划(973)); the Research Grant of University of Macao of China (澳门大学基金资助项目)

作者简介: 朱红斌(1978-),男,湖北孝昌人,博士,主要研究领域为计算机图形学;王文成(1967-),男,博士,研究员,博士生导师,主要研究领域为计算机图形学,可视化,虚拟现实;吴恩华(1941-),男,博士,研究员,博士生导师,主要研究领域为计算机图形学,可视化,虚拟现实.

对骨架的各个关节点进行如下的考察:以关节点为中心,向四周均匀发出辐射线与模型边界相交得到辐射线段,统计这些线段长度的分布以探知该关节点是否位于中心位置.对于偏离中心位置的关节点,使它向中心位置偏移,并修改相应的骨架分支,从而实现骨架的自动矫正.实验表明,新方法能很好地矫正三维骨架,且矫正速度很快,一般不超过骨架抽取时间的2%.

关键词: 矫正;骨架;距离场;三维模型

骨架是模型的最大内切球球心的一维轨迹^[1].应用中它可以代替原模型参与许多运算,从而大大减少计算开销,可广泛用于医学可视化^[2-5]、模式识别^[6]、计算机动画^[7,8]等领域.目前,骨架提取是国际上图形学的一个研究热点.

骨架提取方法大致可分为4类:第1类是Voronoi图方法^[9],通过构造模型的Voronoi图来得到骨架;第2类是剥皮法(Thinning, Erosion)^[10],此类算法从边界开始,反复迭代地逐层剥离离散后的模型,直至剩下一维的骨架;第3类方法是基于距离场的方法^[2-5,7,11],它们先生成关于模型的距离场,再提取距离场中的局部极值点,然后连接这些点,并作一些细化调整就得到了骨架;第4类是基于电学模型的方法^[12],均以模型边界为电源,采用牛顿静电力学模型建立力场,让种子点逐步移动到达力学平衡点,然后依据种子点的相邻关系连接这些平衡点得到骨架.在二维情况下,这些方法都能保证所生成的骨架能很好地反映原模型的几何、拓扑特征.但对于三维模型,Voronoi图方法很难保证骨架是一维的,且计算效率低,后3类方法一般都能得到一维的骨架,且第3类和第3类方法效率较高.对模型的每一个内部离散点,剥皮法需要迭代访问多次,所以与距离场方法相比,它效率较低.

比较直观地说,沿着模型长度方向形成许多垂直该方向的平面,这些平面与模型相交会得到许多截面,在每个截面上取一个局部中间位置的点,再依次连接这些点就可得到骨架.对三维骨架而言,“中间位置”这一概念是存在歧义的.通常截面的几何中心就是骨架意义上的中间位置,如图1(a)所示花瓣状截面中的矩形点.但对于如图1(b)所示的钥匙状截面,其几何中心是圆点位置,但矩形点才应该是骨架上的点.现有的三维骨架提取算法都没有澄清这个歧义,提取出来的骨架都存在质量问题.Voronoi图方法会将图1(a)花瓣状截面的圆点和矩形点都提取出来,在一个截面上获得多个骨架点,产生骨架的冗余分支;对于钥匙状截面,剥皮法会将图1(b)中的圆点位置作为骨架点,而抛弃矩形点;现有的距离场方法能够解决钥匙状截面问题,但都不能保证将图1(a)中的矩形点提取出来作为骨架点;电学模型方法会将1(b)中的圆点和矩形点都提取出来作为骨架点.这样会导致骨架出现冗余分支或偏离模型的中间位置,如图2(b)、图2(c)所示的情况.显然,这样提取的骨架不能很好地反映模型的情况,会在应用时出现问题,比如导致错误的识别结果.因此,必须对骨架进行矫正.

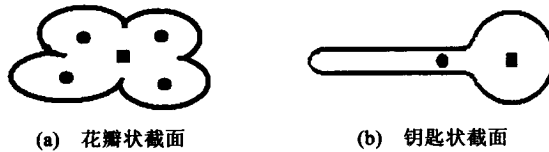


图1 中心位置是矩形点

由于基于距离场提取骨架的效率一般比较高,本文的工作是采用距离场方法得到一个初始骨架,然后采用辐射线方法来矫正初始骨架中的关节点,即以关节点为中心往四周均匀地发出辐射线,检测这些辐射线与模型边界相交所形成线段的长度的分布,以探测这些关节点是否在中间位置,并对偏离中间位置的关节点进行矫正.这样所得到的骨架消除了上述歧义,能很好地反映模型的几何、拓扑特征.与提取骨架的时间相比,该方法进行矫正所花费的时间很少,一般不超过骨架提取的2%,不影响骨架提取的整体效率.

1 相关工作

依据距离的参照系,提取骨架的距离场可分为两类:到源点的距离场,记为DFS(distance field from source),一般在模型表面上选取一个源点,然后计算模型表面上或内部的所有点到该源点的距离,得到的距离场即为DFS;到模型边界的距离场记为DFB(distance field from boundary),对于模型内部的每一点,计算该点到模型边

界的最短距离,得到的距离场即为 DFB.基于这两种距离场的骨架提取方法分别称为 DFS 方法和 DFB 方法.距离场方法一般需要先要将模型离散为规则数据场的体素表达,再进行骨架提取的工作.

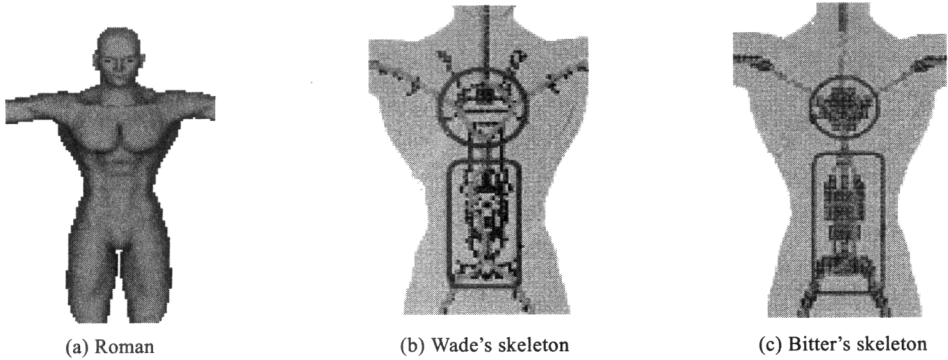


图2 Roman模型的骨架,其中浅灰色为模型,深灰色为DMS,曲线为骨架.圆圈标记的是冗余分支问题,矩形标记的是偏离中心问题

在这些方法中大多使用 Dijkstra 算法^[13]来构造距离场或者进行骨架节点的搜索.Dijkstra 算法事先构造某特定权值来度量图中路径的长度,然后从图的某指定源点出发,依据路径长度的递增次序,来产生到所有其他顶点的全局最短路径.于是,若把模型表面多边形的所有边和顶点看作一个连通图,把多边形的边的欧氏长度作为路径权值,那么运用 Dijkstra 算法就可以在模型表面上建立 DFS.若把 DFB 值看作是高度值,模型的 DFB 就是一个高度位图,那么骨架分支就是该位图的“山脊线”.若构造某路径权值,使之随 DFB 值(高度值)单调递减,那么运用 Dijkstra 算法得到的某两点间的最短路径,就是这两点间的“山脊线”,这样就得到了一条骨架分支.提取所有这样的分支,就可得到模型的完整骨架.

在 DFS 方法中,Lazarus^[14]借助 Dijkstra 算法在模型多边形表面上建立 DFS,再基于 DFS 提取模型截面的边界多边形序列,他称该序列为 LSD(level set diagram),连接这些多边形的几何中心成为骨架.显然,该方法在处理钥匙状截面时不能得到正确的骨架点.Zhou^[2]采用 1-2-3 距离机制在模型内部构造 DFS(SS-coding),再运用所谓的 BS-Coding 来获取模型截面中心点,连接这些点就是骨架.由于 BS-Coding 实际上构造了 DFB,它不能解决花瓣状截面的问题.并且在模型曲率较大的区域,即有尖角的区域,这两种方法得到的骨架会切去尖角而偏离模型中间位置.

DFB 方法的一般步骤是:首先在模型内部建立 DFB,再用图的数据结构存储一个能较好地反映模型几何拓扑特征的连通体素集,简称为中性面 DMS(discrete medial surface),然后构造一个与 DFB 值相关的权值,再运用 Dijkstra 算法在 DMS 上提取一维的骨架.DMS 一般是三维模型的二维简化表达,由具有较大 DFB 值的体素构成,其体素数目大大少于原模型的体素数目,这样可以大大减少 Dijkstra 算法提取骨架的时间.不同的 DFB 方法在构造 DMS 和 Dijkstra 算法权值两方面各有不同.但 Ma^[11]是一个例外,他采用 RBF(radial basis function)计算 DFB,对 RBF 求导得到 DFB 的梯度场,然后将种子点沿梯度场方向移动到梯度为零的位置,再依据种子点相邻关系连接这些位置得到骨架.

Bitter 和 Sato 等人在 CEASAR^[3],TEASAR^[4],Penalized-distance^[5]这 3 篇文章中,均采用 Saito^[15]提出的算法计算 DFB,然后基于对其梯度场的分析提取局部极值点,进而连接这些极值点得到 DMS.这个 DMS 能够保证包含所有的骨架点.他们采用的 Dijkstra 算法权值综合考虑了 DFB 值和相邻体素间距的影响,即所谓的 Penalized-distance 权值.文献[3]直接将得到的中线(centerline)作为 Colon 的骨架,文献[4]进一步给中线添加分支,构造了更加详细的骨架,而文献[5]由用户给定阈值来控制分支的详细程度.

为方便调整骨架提取的精度,Wade^[7]提出了 Exposure 概念: $Exposure(i)=\min\{DFB(i)+dis(i,i_j)-DFB(i_j)\}$,其中 i_j 是体素 i 的第 j 个邻居, $j=1,2,\dots,26$, $dis(i,i_j)$ 是第 i,i_j 这两个体素的间距.Wade 提出一种近似 DFB 构造方法建立 DFB,在此基础上构造 Exposure 场,通过用户指定的 Exposure 阈值建立 DMS.于是,用户可以控制这个 DMS 的大小以调整骨架提取的精度.但该方法会丢弃图 1(a)中的矩形点,故不能保证所有骨架点都在 DMS 上.Wade 为

Dijkstra 算法构造的权值就是 DFB 值的三次方的倒数,不考虑相邻体素间距的影响。

Wan^[16]也采用 Saito 的算法来计算 DFB,他将整个距离场转化为 DMS,然后计算其最小生成树,然后在此基础上提取中线,Wan 为 Dijkstra 算法构造的权值就是 DFB 的倒数。

采用 DFB 方法能较好地处理图 1(b)的钥匙状截面,因为圆点处的 DFB 值小于矩形点处的 DFB 值,使得矩形点更容易被认为是局部极值点,而且 DFB 方法也能够保证模型尖角不会被切去。但是对于图 1(a)的花瓣状截面,圆点处的 DFB 值要大于矩形点处的 DFB 值,这使得各种 DFB 方法都不能正确地将矩形点提取出来作为骨架点,它们都会出现如图 3(b)(c)所示的问题。Bitter 的 Penalized-distance 权值综合考虑了 DFB 值和相邻体素间距的影响,产生的骨架分支会包含更多的 6-邻居体素,这能在一定程度上缓和骨架的偏离现象。对比图 3(b)和图 3(c)的人体上身部分的骨架分支可以看出,Bitter 方法的骨架偏离中心位置的距离小一些。Ma^[11]不采用 Dijkstra 算法提取骨架,但他的方法同样没有解决花瓣截面问题。

对于距离场抽取骨架的两种方法 DFS 和 DFB,DFS 方法必须对多个源点使用 Dijkstra 算法以保证所得到的骨架具备仿射不变性,而线性时间内建立 DFB 的算法已经成熟。因此,DFB 方法效率一般比 DFS 方法要高。为此,本文采用 DFB 方法来生成初始骨架。

2 三维模型骨架的矫正

2.1 基本概念

对于骨架中的各个节点,如果它的度为 1,则称其为一个端点;如果它的度为 2,则称其为一个连接点;如果它的度大于 2,则称其为一个关节点。如图 3 所示,骨架一般采用树结构来存储,并以一个端点为树的根节点。相邻关节点之间或者一个关节点和其相邻端点之间的骨架部分,称为骨架的分支。

2.2 问题分析

对于 DFB 方法而言,如果采用某种权值的 Dijkstra 算法,能使得连接某两点的 shortest path 穿过 DFB 值局部极大的点,那么在连接两点的所有路径中,这条路径是最靠近模型中间位置的。因而就可以把这样的路径看作一条骨架分支。现有的 DFB 方法都是使该权值随 DFB 值单调递减^[3-5,7]。对于三维模型而言,在某些局部区域的点会具有相近的 DFB 值,这样,Dijkstra 算法在该区域搜索骨架节点时,会有多个点满足要求,且这些点可能都不在该区域的中心位置,这使得该区域中心位置的点不一定能被选为骨架点,从而出现骨架偏离的情况。如图 1(a)的例子,其中圆形点的权值小于矩形点,DFB 方法会把圆形点当作骨架点而丢弃矩形点。

对于如图 2(a)所示的 Roman 模型胸口附近的截面形状近似花瓣,我们用 Wade 和 Bitter 的算法提取骨架时会出现质量问题,如图 2(b)和图 2(c)所示。

2.3 基于辐射线矫正

分析骨架抽取的过程可知,发生骨架偏离或冗余分支的情况,往往是在骨架的关节点,因为关节点所在的区域对应的 DMS 常常有多个点满足 Dijkstra 算法的搜索要求,且它们可能还都不在模型的局部中心位置。因此,在生成初始骨架以后,只要将骨架的关节点矫正到正确位置,再运用适当权值的 Dijkstra 算法重新生成相关的骨架分支,就可以达到消除冗余分支和纠正骨架偏离中心的目的。

为此,我们采用以下方法将关节点矫正到正确位置,也就是将骨架点从图 1(a)花瓣状截面中的圆点位置矫正到矩形位置,而这两个位置的本质区别在于后者是形状的几何中心。

如图 4 所示,过某关节点 P_i (也记为 P_i^0)向四周均匀发出 N 条辐射线,它们与模型边界交于 $E_j, j=1,2,\dots,N$,记矢量 $p_i^0 = \sum_j w_j \cdot \overrightarrow{p_i^0 E_j}$,其中 $\overrightarrow{p_i^0 E_j}$ 是连接两点 P_i^0, E_j 的矢量, w_j 是某权值,用于控制第 j 条辐射线的影响,有关它的计算在下面有详细讨论。显然,矢量 p_i^0 指向该点附近的几何中心。过 P_i^0 沿 p_i^0 方向的直线被模型截得线段的中

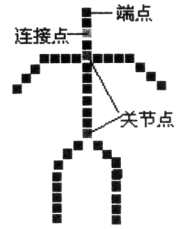


图 3 骨架树

点记为 P_i^1 , 显然 P_i^1 比 P_i^0 更靠近几何中心.

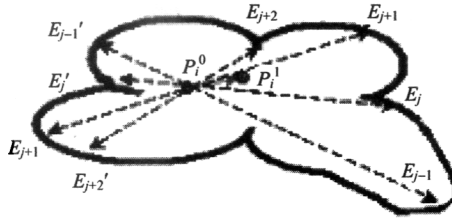


图4 箭头 $P_i^0 P_i^1$ 为矢量 p_i^0

然后,再以 P_i^1 作为输入,迭代以上过程,直至 $P_i^n = P_i^{n+1}$ 时,就可认为 P_i^{n+1} 是该区域的几何中心.

矫正关节点以后,重新生成与它相关联的分支,因为新分支所在的体素路径需要重新搜索.此时,生成分支的 Dijkstra 算法采用的权值将考虑相邻体素间距的影响,使得骨架分支能位于中心位置.

对于整个三维模型而言,骨架上的所有点都应该位于该点附近的局部形状的中间位置.在上述的迭代矫正过程中,如果不设置权值 w_j ,就有可能破坏这种局部性.例如对于人体胸部的关节点,由于有若干辐射线会与腿部相交,若没有权值的限制,就会使得胸口的关节点被矫正到腹部,如图4中的矢量 $\overline{P_i^0 E_{j-1}}$ 会产生这种影响.另一方面,这种局部性决定了这样的辐射线数量只占全部辐射线的一小部分.于是,基于这两个方面的考虑,权值 w_j 的构造按以下方式进行:

1. 令 $v_j = \overline{P_i^0 E_j} + \overline{P_i^0 E_j'}$, 于是 $p_i^0 = \sum_j w_j \times v_j$;
2. 对于所有的 $v_j, j=1, \dots, n$, 找出其中的最大者 $\max\{\|v_j\|\}$ 和最小者 $\min\{\|v_j\|\}$, 并记 $\Delta_i = \max\{\|v_j\|\} - \min\{\|v_j\|\}$;
3. 在一个实数轴上将区间 $[\min\{\|v_j\|\}, \max\{\|v_j\|\}]$ 均匀划分为 L_i 段(例如 $L_i = N/4$);
4. 构造集合 $S_k = \{v_j | (k-1) \times \Delta_i / L_i \leq \|v_j\| \leq k \times \Delta_i / L_i\}$, 记 N_k 为 S_k 元素的个数;
5. 生成 $w_j = \frac{N_k}{N/2} \times \frac{1/\|v_j\|}{\sum_{v_k \in S_k} 1/\|v_k\|}$, 其中 $v_j \in S_k$.

冗余分支两端的关节点理论上会被矫正到同一位置.但实际计算时会有误差影响,为此,如果初始骨架中两相邻关节点矫正后的间距很小,就认为是同一个关节点.另外,同样是因为误差影响,上述的矫正迭代过程可能出现反复震荡而不收敛,为此,我们设置一个迭代深度值来终止不收敛或收敛太慢的迭代计算,一般取 10 即可.一般而言,辐射线数目 N 越大,迭代结果越精确,但计算量也更大.根据大量实验,我们取 $N=36^2$,即在经线纬线两方向都取 10° 为采样间距均匀采样时,既能有较快的计算速度,又能很好地保证矫正质量.

基于以上讨论,矫正算法如下:

1. 把所有关节点和端点依据连接关系转化为树结构.
2. 对所有关节点进行矫正,即对于一个关节点 J ,运用上述矫正算法得到 J' ,用 J' 更新 J ,标记 J 已处理.
3. 根据矫正的关节点,对其相关的骨架分支进行矫正.

实际中许多模型不存在这种中间位置歧义,如管状模型.显然,对它们无须矫正,为此,让用户指定参数,以决定是否进行矫正.

3 三维模型骨架的提取

基于以上讨论,本文采用 DFB 方法来抽取初始骨架,然后再进行骨架矫正.其流程是:(1) 三维模型预处理;(2) 计算距离场 DFB;(3) 提取中性面 DMS;(4) 提取骨架;(5) 矫正骨架并输出.

3.1 预处理

在进行骨架提取前,要建立三维模型的规则数据场表示,具体参见文献[7].

3.2 距离场DFB

骨架提取的第2步是计算DFB,本文实现了Wade^[7],Saito^[15],Maurer^[17]这3种DFB计算方法.表1是这3种方法的运行时间比较,时间单位是s.

表1 DFB构造时间比较

模型	体素数目	Saito	Wade	Maurer
Roman	118 363	0.500	0.266	0.096
Horse	373 608	1.219	1.094	0.594
Bull	923 915	3.359	2.985	1.185

图5是同一模型在输入完全相同的参数的情况下,运用Bitter^[5]方法产生的DMS,但其中图5(a)~图5(c)用到的DFB分别采用Wade,Saito,Maurer这3种方法来生成.可见3种方法生成的DFB的差距并不大.但Maurer方法效率高并且理论上是精确的距离场,故本文采用Maurer方法来建立DFB.

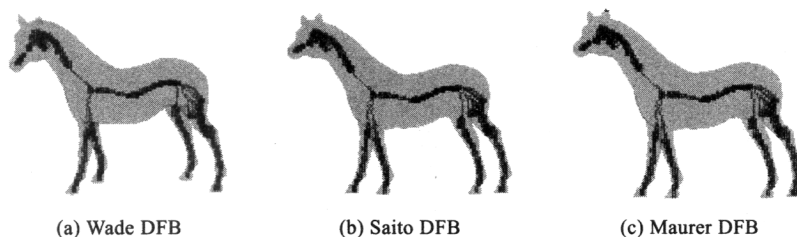


图5 Horse模型基于不同距离场的DMS(用深色小球显示)

3.3 中性面DMS

本文采用Bitter^[5]方法来建立DMS.它是基于DFB的梯度场分析来建立DMS的,能够保证所有骨架点都位于该DMS上.其操作步骤如下:

- 将一个立方体沿3个方向上的中线切3刀,得到8个小立方体,即8个体素,称这8个体素的集合为一个 2^3 Cell.对应的二维情况,就是4个体素组成一个 2^2 Cell. Bitter分析每个 2^3 Cell中8个体素的梯度矢量,若这个 2^3 Cell的平均梯度矢量与其中至少1个梯度矢量夹角大于 90° ,则标记 2^3 Cell的8个体素为局部极值.
- 再依据梯度方向连接所有已标记的 2^3 Cell得到DMS.

在大多数情况下,Bitter都能建立连通的DMS,但实际中会出现不连通情况.图6是这种情况的一个2D例子.由于4个体素各自的梯度矢量与平均矢量夹角都小于 90° ,所以该 2^2 Cell的4个体素不会被标记为局部极值.且体素3和4的梯度矢量互相指向.于是,当某两个已标记 2^2 Cell的连接路径经过3或者4时,连接路径不能再继续延伸,从而会导致DMS不连通.为此,我们把出现梯度矢量互相指向的 2^3 Cell也标记为局部极值,就可解决这个问题.图7是这样处理前后的DMS对比.

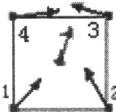


图6 中间的箭头为平均梯度

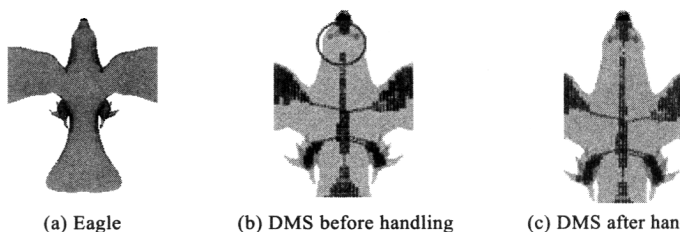


图7 Eagle模型的DMS,圆圈标记部分不连通

3.4 提取骨架

基于上述DMS,参照Wade^[7]的提取步骤,采用Bitter^[5]的Penalized-distance权值修改Dijkstra算法就能得到初始骨架.

3.5 矫正并输出

检测用户指定的阈值以决定是否启动第 2.2 节所述的矫正算法.若不矫正则直接输出初始骨架,否则矫正后再输出骨架.

4 实验结果

我们以 Visual C++6.0 实现了本文的矫正方法,提取骨架的 Wade^[7]和 Bitter^[5]的算法,并在一台 Dell Computer Corporation OptiPlex GX260 微机上进行了实验.该计算机配置了一个 Pentium4 2.6GHz CPU,512M 内存,Win2000 Professional SP4 操作系统.

表 2 是若干模型的测试数据对比,其中体素数目是模型内部体素和边界体素的数目之和.图 8 是 6 个用本算法自动生成的骨架.其中,图 8(a)~图 8(c)为矫正前后的效果对比,而图 8(d)~图 8(f)是管状外形模型,其骨架没有经过矫正.

表 2 骨架提取算法运行效率对比

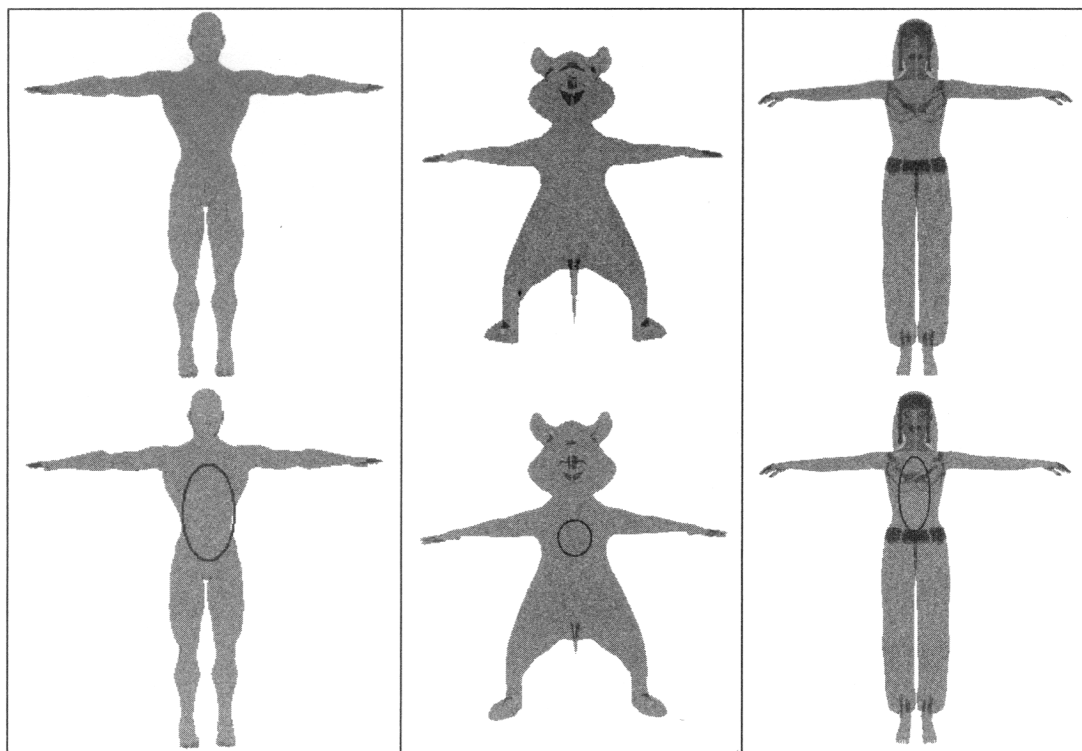
模型	体素尺寸	体素数目	各方法提取骨架时间(s)				矫正效率%(b ⁺)
			Wade	Bitter	有矫正(a [*])	没有矫正(a [*])	
Mouse	0.008	87 253	3.287	3.750	3.343	3.307	1.088 6
Roman	0.008	31 577	0.877	0.984	0.937	0.921	1.737 2
Roman	0.006	70 513	1.753	1.843	1.672	1.653	1.149 4
Roman	0.005	116 784	2.407	3.000	2.296	2.271	1.100 8
Bull	0.01	64 821	0.915	1.266	1.075	1.057	1.702 9
Bull	0.008	122 994	2.528	2.907	2.828	2.799	1.036 1

a^{*} 有矫正和没有矫正:是指在所有其他步骤和参数均相同的情况下,是否采用矫正步骤而提取骨架的时间.

b⁺ 矫正效率 = $\frac{\text{有矫正} - \text{没有矫正}}{\text{没有矫正}} \times 100$.

5 结论

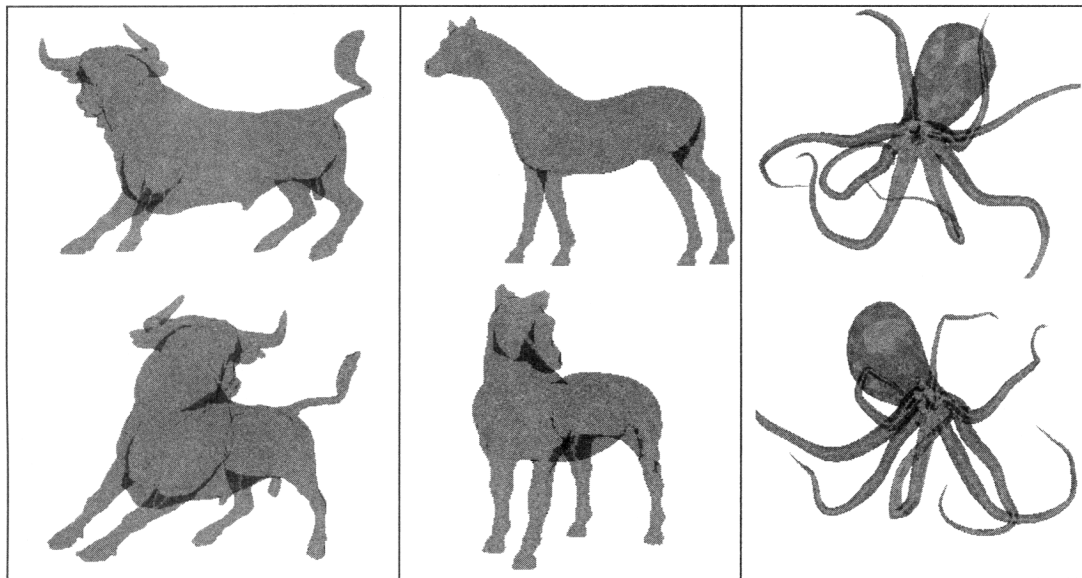
对复杂的 3 维模型进行骨架抽取时,目前的各种抽取方法会发生骨架偏离中心位置及冗余分支的失误情况,严重影响骨架对模型的几何、拓扑特征的表达.为此,在分析产生骨架失误的原因以后,我们提出了一个高效的骨架矫正方法,即在基于距离场抽取骨架以后,对其中的关节点进行检测并矫正不合适的关节点及相关的分支.该方法能够自动完成,并且矫正时间很少,一般不超过骨架提取的整个时间的 2%.与目前先进的骨架提取方法相比,新方法不仅能保证高质量地得到骨架,而且运算速度与它们相差不大.



(a) Roman (Voxel size=0.005)

(b) Mouse (Voxel size=0.007)

(c) Woman (Voxel size=0.005)



(d) Bull (Voxel size=0.006)

(e) Horse (Voxel size=0.008)

(f) Octopus (Voxel size=0.005)

图8 绿色小球为骨架.图8(a)~图8(c)上排骨架经过校正,而下排未经校正,其中红色标记是出现质量问题的部分.管状外形模型图8(d)~图8(f)未经校正,上下排是同一骨架

References:

[1] Blum H. A transformation for extracting new descriptions of shape. In: Wathen-Dunn W, ed. Models for the Perception of Speech and Visual Forms. Cambridge: MIT Press, 1967. 362~380.

- [2] Zhou Y, Toga AW. Efficient skeletonization of volumetric objects. *IEEE Trans. on Visualization and Computer Graphics*, 1999,5(3):196~209.
- [3] Bitter I, Sato M, Bender MA, McDonnell KT, Kaufman AE, Wan M. CEASAR: A smooth, accurate and robust centerline extraction algorithm. In: *Proc. of IEEE Visualization 2000*. Los Alamitos: IEEE CS Press, 2000. 45~52.
- [4] Sato M, Bitter I, Bender MA, Kaufman AE, Nakajima M. TEASAR: Tree-Structure extraction algorithm for accurate and robust skeletons. In: *Proc. of Pacific Graphics*. Washington: IEEE CS Press, 2000. 281~289.
- [5] Bitter I, Kaufman AE, Sato M. Penalized-Distance volumetric skeleton algorithm. *IEEE Trans. on Visualization and Computer Graphics*, 2001,7(3):195~206.
- [6] Hilaga M, Shinagawa Y, Kohmura T, Kunii TL. Topology matching for fully automatic similarity estimation of 3D shapes. In: Pocock L, ed. *SIGGRAPH 2001 Proc*. New York: ACM Press, 2001. 203~212.
- [7] Wade L, Parent RE. Automated generation of control skeletons for use in animation. *The Visual Computer*, 2002,18(2):97~110.
- [8] Mohr A, Gleicher M. Building efficient, accurate character skins from examples. In: *SIGGRAPH 2003 Proc*. New York: ACM Press, 2003. 562~568.
- [9] Attali D, Lachaud JO. Constructing ISO-surface satisfying the delaunay constraint: Application to the skeleton computation. In: *Proc. of the Image Analysis and Processing*. Washington: IEEE CS Press, 1999. 382~387.
- [10] Telea A, Vilanova A. A robust level-set algorithm for centerline extraction. In: *Proc. of the EG/IEEE VisSym 2003*. New York: ACM Press, 2003. 185~195.
- [11] Ma WC, Wu FC, Ouhyoung M. Skeleton extraction of 3d objects with radial basis functions. In: Kim MS, ed. *Proc. of Shape Modeling Int'l 2003*. IEEE CS Press, 2003. 207~215.
- [12] Wu FC, Ma WC, Liou PC, Liang RH, Ouhyoung M. Skeleton extraction of 3D objects with visible repulsive force. In: Kobbelt L, Schrder P, Hoppe H, eds. *Eurographics Symp. on Geometry Processing*. New York: ACM Press, 2003.
- [13] Dijkstra EW. A note on two problems in connexion with graphs. *Numerische Mathematik*, 1959,1:269~271.
- [14] Lazarus F, Verroust A. Level set diagrams of polyhedral objects. In: *Proc. of the ACM Symp. on Solid Modeling and Applications*. New York: ACM Press, 1999. 130~140.
- [15] Saito T, Toriwaki J. New algorithms for euclidian distance transformation of an n-dimensional digitized picture with applications. *Pattern Recognition*, 1994,27(11):1551~1565.
- [16] Wan M, Dachille F, Kaufman AE. Distance-Field based skeletons for virtual navigation. In: *Proc. of the 12th IEEE Visualization Conf*. Washington: IEEE CS Press, 2001. 239~246.
- [17] Maurer CR, Qi RS, Raghavan V. A linear time algorithm for computing exact Euclidean distance transforms of binary images in arbitrary dimensions. *IEEE/Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2003,25(2):265~270.