

文章编号: 1002-0411(2004)06-0685-04

基于数字距离变换的 3D 模型骨架提取算法

樊雅萍¹, 黄生学¹, 温佩芝², 史泽林²

(1. 柳州师范专科学校, 广西 柳州 545003; 2. 中国科学院沈阳自动化研究所, 辽宁 沈阳 110016)

摘要: 在获得三维模型体素表示的基础上, 通过比较模型体素及其 26 连通域体素到模型轮廓的最小欧氏距离, 提出了一种利用骨架体素 26 连通域的对称性进行三维模型骨架体素提取的算法. 整个算法只需遍历一次体数据集即可自动完成模型骨架的提取过程. 实验表明, 该算法具有较高的效率和精度.*

关键词: 三维模型; 体素模型; 数字距离变换; 骨架提取

中图分类号: TP301

文献标识码: A

A Skeletonization Method for 3D Model Based on Digital Distance Transform

FAN Ya-ping¹, HUANG Sheng-xue¹, WEN Pei-zhi², SHI Ze-lin²

(1. Liuzhou Teachers College, Liuzhou 545003, China;

2. Shenyang Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China)

Abstract: On the basis of voxel representation of a 3D model and comparison of the minimal Euclidean distance between a feature voxel and its 26-connectness, a skeletonization algorithm is proposed by using the symmetry of the 26-adjacent of the current feature voxel. The skeleton can be extracted automatically by searching the volume dataset only once. Experiments show that this skeletonization method is efficient and accurate.

Keywords: 3D model; voxel model; digital distance transform; skeletonization

1 引言 (Introduction)

骨架是表示物体的一种很自然的形式, 三维模型的骨架可以看成是由物体中所有最大内接球中心所在位置点构成^[1]. 三维模型的骨架在如计算机视觉^[2]、医学图像可视化^[3]、特征提取与表示、模型匹配跟踪^[4]等诸多领域有着广泛应用. 通常的骨架提取算法有基于边界的方法, 主要是基于 Voronoi 图的方法^[5]; 2D 和 3D 图像细化算法^[2]; 模拟 Grassfire 方法^[6]; 基于距离变换的算法^[5]; 基于体素编码的算法^[4]以及基于尺度空间的中心线抽取算法. 本文利用矢量街区矢量距离变换 (vector city vector distance transform, VCVDT) 方法准确计算三维体素模型距离场, 然后利用骨架体素的 26 连通域的对称性进行三维模型骨架体素提取, 得到模型的骨架表示. 整个算法全自动进行而无须人工干预, 且具有较高的计算效率和精度.

2 三维模型体素化 (3D model voxelization)

在进行三维模型骨架提取前, 必须首先获得模

型的体素表示. 体素化 (voxelization) 是将物体的表面几何形式表示转换成最接近该物体的体素表示形式, 产生体数据集 (volume datasets), 其不仅包含模型的表面信息, 而且能描述模型内部属性. 体素是体图形学中描述几何图元的最小基本单元, 体素 (voxel) 可以理解为二维像素在三维空间的推广, 它们是一组分布在正交网格中心的立方体单元. 基于体素的三维模型有诸多应用, 例如医学影像、流体力学、碰撞检测、地形造型、机械零件造型和制造等领域. 体素化算法可分为基于图像空间的算法和基于物体空间的算法, 本文采用文献[7]中的算法, 将 3D 模型做体素化离散, 如图 1(a) 所示为一个三维模型, 图 1(b) 为该模型的体素模型.

为描述问题方便, 引入如下定义.

定义 1 如果两个体素间存在一个公共顶点或一条公共边或一个公共面, 则称两个体素是 26-邻接的.

定义 2 如果两个体素间存在一条公共边或一个公共面, 则称两个体素是 18-邻接的.

定义 3 如果两个体素间存在一个公共面, 则

称两个体素是6-邻接的。

定义4 如果三维体数据的一个序列中任何一对相邻体素都是N-邻接的,则这个序列构成一条N-路径,N的取值为6,18,26。

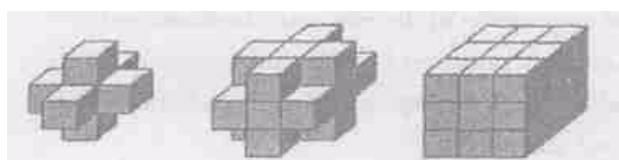
定义5 在三维体数据中,如果两个体素之间存在一条N-路径,那么称这个体素是N-连通的。

在体素的三种邻接关系中,6-邻接是约束最强的,其次是18-邻接,26-邻接约束最弱,三者的关系可表示为6-邻接 \subset 18-邻接 \subset 26-邻接,如图2所示。



图1 三维模型及体素模型

Fig.1 3D model and voxel-based model



6-邻接 18-邻接 26-邻接

图2 体素邻接关系

Fig.2 Adjacent relationship between voxels

3 体素模型距离场计算 (Distance field computation for voxel-based model)

在基于距离变换的模型骨架抽取算法中,模型内部体素到边界体素的距离计算至关重要.距离变换是三维图像中快速计算背景点到所选特征最小欧氏距离的一种方法,称为数字距离变换(digital distance transform, DDT),简称距离变换法.在提取模型骨架时必须计算出模型的距离场,即体素模型中内部体素到边界体素的最小距离。

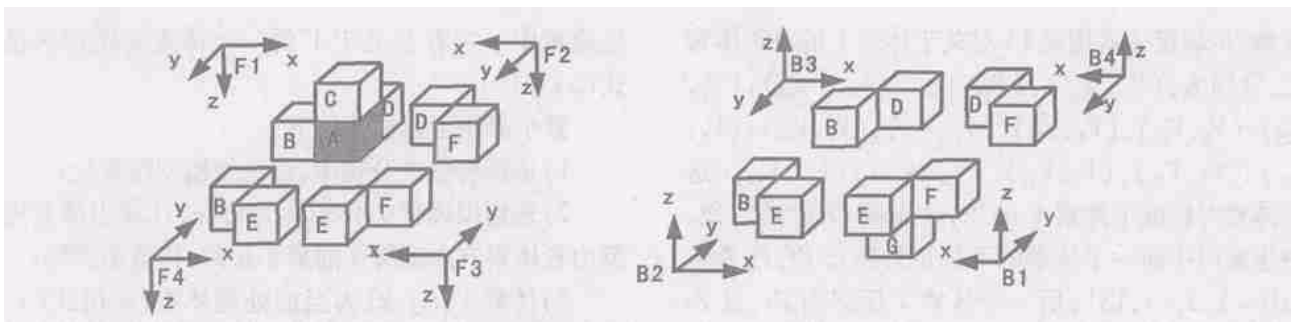
直接采用三维空间的距离计算公式效率将非常低,Rosenfeld^[8]提出了一种以合理的计算时间近似计算二维、三维空间中点与点之间欧氏距离的方法.距离变换是二维和三维图像处理、计算机视觉、科学可视化中十分有用的工具.Borgefors^[9]提出斜切距离变换方法(chamfer distance transform, CDT),其假定为每一像素(或体素)到特征像素(体素)的最小距离可以用其相邻的值加上一个模板恒值得到,该方法可以计算精确的城市-街区距离(city-block distance, CBKD)和棋盘距离(chess-board distance, CBDD),但些距离也只是对欧氏距离的一个近似.Danielsson^[10]提出一种计算离物体表面最近点的矢量距离变换方法(vector distance transform, VDT),该方法比CDT方法效率低,但能获得较准确的欧氏距离.Mullikin^[11]提出了一种更准确的计算欧氏距离的方法(efficient vector distance transform, EVDT);Satherley^[12]提出一种矢量街区矢量距离变换方法(vector city vector distance transform, VCVDT),由向前和向后两种变换模板,采用8通路变换模型可以获得很高精度的欧氏距离.其基本原理是在初始时将所有的“背景”点赋值为“ $+\infty$ ”,将“特征”点赋为“0”.距离变换快速计算背景体素到特征体素最小距离的原因在于,DDT应用一个变换模板从图像的两个对角滑动,滑动时将当前体素及相邻体素的距离值与模型对应位置的值相加,取相加之和的最小值作为当前体素到特征体素的最小距离.在骨架提取算法中,为得到三维模型精确骨架,必须获得较高精度的模型距离场,为此本文中采用VCVDT方法计算体素模型距离场,VCVDT模板如图3所示^[12]。

表1给出了四个体数据模型的EVDT距离场计算,表2给出了8通路VCVDT计算的一组三维体数据的时间消耗及每个体素的平均误差.由表1、表2的数据对比可见,8通路的VCVDT距离变换得到的

表1 EVDT距离场计算

Tab.1 Distance field computation based on EVDT

数据集	分辨率	执行时间 (s)	距离范围		误差范围		每个体素的 平均误差
			min	max	min	max	
Cthead skull	256 × 256 × 113	7.540	-4.242	109.595	-0.518	2.533	0.004761
Sphere	80 × 80 × 80	0.284	-27.677	39.268	-1.659	1.984	0.010045
Pawn	60 × 60 × 60	0.116	-7.000	37.670	-0.394	1.013	0.009697
Queen	60 × 60 × 60	0.116	-6.633	39.674	-0.381	0.928	0.008117



(a) 前向模板 (b) 后向模板
 A: (0,0,0) B: (-1,0,0) C: (0,0,-1) D: (0,-1,0) E: (0,1,0) F: (1,0,0) G: (0,0,1)

图 3 8 通路 VCVDT 数字距离变换模板

Fig.3 8-Channel DDT masks for VCVDT

距离场比 EVDT 具有更高的精度和效率.

显示,从图中可以看出采用 VCVDT 距离变换计算得到的距离场能很好地模拟真实距离场.

图 4 为一个立方体模型距离场图像(从中间切片显示),图 5 为一中间切片图像上距离场三维空间

表 2 VCVDT 距离场计算

Tab.2 Distance field computation based on VCVDT

数据集	分辨率	执行时间 (s)	距离范围		误差范围		每个体素的 平均误差
			min	max	min	max	
CThead skull	256 × 256 × 113	5.470	- 4.243	109.595	- 0.334	0.334	0.000223
Sphere	80 × 80 × 80	0.302	- 27.677	39.268	- 0.268	0.268	0.000559
Pawn	60 × 60 × 60	0.134	- 7.000	37.670	- 0.310	0.278	0.000233
Queen	60 × 60 × 60	0.134	- 6.633	39.674	- 0.268	0.268	0.000179

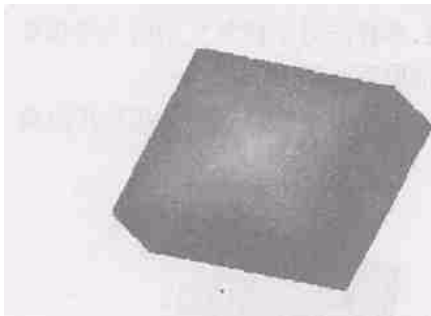


图 4 体素模型距离场
 Fig.4 Distance field of voxel model

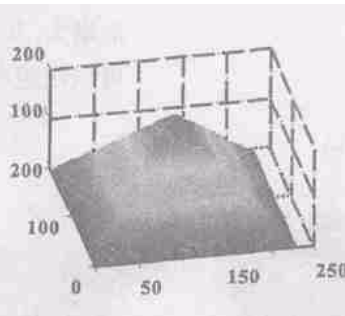


图 5 距离场图像
 Fig.5 Image of a distance field

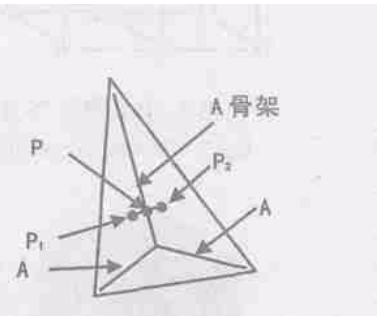


图 6 距离梯度场图像
 Fig.6 Distance gradient image

4 模型骨架提取算法 (Model skeletonization algorithm)

4.1 算法基本原理

由于在计算距离场时是以模型外轮廓为特征计算得到的,所以在模型骨架上的体素(像素)具有到轮廓特征的最大距离值,且骨架体素(像素)两侧的距离值均关于骨架呈近似对称.以二维为例,如图 6 所示,图中 A 所示为骨架, P 为骨架上一点, P₁、P₂ 为骨架两侧且关于点 P 对称的两点,这两点必须满足:

$$d_p > d_{pi}, \quad i = 1, 2 \quad (1)$$

$$|d_{pi} - d_{pj}| < \epsilon, \quad i, j \in \{1, 2\} \text{ 且 } i \neq j \quad (2)$$

式中 d_p 表示 P 点处的距离值, d_{pi} 、 d_{pj} 为关于点 P 对称的两点, ϵ 为一指定极小阈值.当图像内一点满足式(1)和(2)时,点 P 是骨架上一点.

4.2 3D 模型骨架提取算法

在 3D 空间中需同时考虑在三个坐标轴方向的情况,如图 7 所示,图中 V 为当前体素,体素 V_{22} 、 V_5 、 V_{13} 、 V_{14} 、 V_{16} 和 V_{11} 分别为 V 的 6-邻接体素, V_i ($i = 1, 2, \dots, 26$, 且 $i \neq (22, 5, 13, 14, 16, 11)$) 分别为 V 的 18-邻接和 26-邻接体素.由体素 V 的 6-邻接、

18-邻接和 26-邻接体素构成 13 对关于体素 v 的对称体素对, 分别为: $(V_5, V_{22}), (V_{13}, V_{14}), (V_{11}, V_{16}), (V_2, V_{25}), (V_6, V_{21}), (V_8, V_{19}), (V_4, V_{23}), (V_1, V_{26}), (V_3, V_{24}), (V_9, V_{18}), (V_7, V_{20}), (V_{10}, V_{17}), (V_{12}, V_{15})$. 这些体素对构成了体素 v 的 26 连通域. 为叙述方便, 将体素对中前一个体素的下标记为集合 Z_f , 且 $Z_f = \{i | i = 1, 2, \dots, 13\}$; 后一个体素下标记为 Z_s , 且 $Z_s = \{i | i = 14, 15, \dots, 26\}$. 与在 2D 空间类似, 设 d_v 为体素 v 的距离值, d_{vi} 为体素 v 的 26-邻接体素的距离值. 如果体素 v 的距离值满足式 (3) 和 (4), 则 v 为骨架体素.

$$d_v > d_{vi}, \text{ 且 } d_{vi} > d_{vj}, \quad i \in Z_f, j \in Z_s \quad (3)$$

$$|d_{vi} - d_{vj}| < \varepsilon, \quad i \in Z_f, j \in Z_s \quad (4)$$

以一个体素对组合 (V_{24}, v, V_3) 为例, 如果 $d_v > d_{v24}, d_v > d_{v3}$ 且 $|d_{v24} - d_{v3}| < \varepsilon$, 则体素 v 为骨架体素, 并且可以预见体素 V_{10} 和 V_{17} 也应该为骨架体素. 同理可知, 只要当前体素 v 为骨架体素, 则在其 26

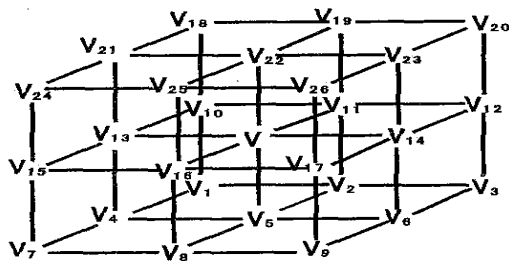


图 7 体素模型 26 连通域

Fig. 7 26-adjacent of voxel model

连通域中一定存在关于 v 的一个体素对距离满足式 (3) 和 (4).

整个算法可以描述如下:

- 1) 选择合适的分辨率, 将三维模型体素化;
- 2) 选定以模型边界轮廓为特征, 计算出体素模型内各体素节点到特征的最小距离, 构造距离场;
- 3) 体素 $V(i, j, k)$ 为当前处理体素, 应用式 (3) 和 (4) 计算体素 v 的 26 连通域体距离值, 如果在 13 对对称体素对中有一对同时满足式 (3) 和式 (4), 则体素 v 为骨架体素;
- 4) 是否处理完所有模型体素, 如果是, 结束骨架提取过程, 否则返回 3) .

5 实验及结论 (Experiments and conclusion)

本文以 VC++6.0 为开发工具, 采用 OpenGL 的 glut 库作为显示环境, 在 Windows 2000 平台上实现了上述三维模型的骨架抽取算法. 实验结果如图 8 所示, 其中图 (a) .(b) .(c) 和 (d) 为四个三维物体模型, 图 (e) .(f) .(g) 和 (h) 为利用本算法提取的对应以上模型的骨架表示, 这里体素模型的分辨率为 64. 实际应用时体素模型的分辨率可以根据具体需要进行选择和调整, 时间复杂度随着分辨率的提高而增大. 实验表明, 本算法对于任意复杂的三维模型可以快速有效地抽取其骨架.

本文通过体素化三维模型, 采用 VCVD 距离

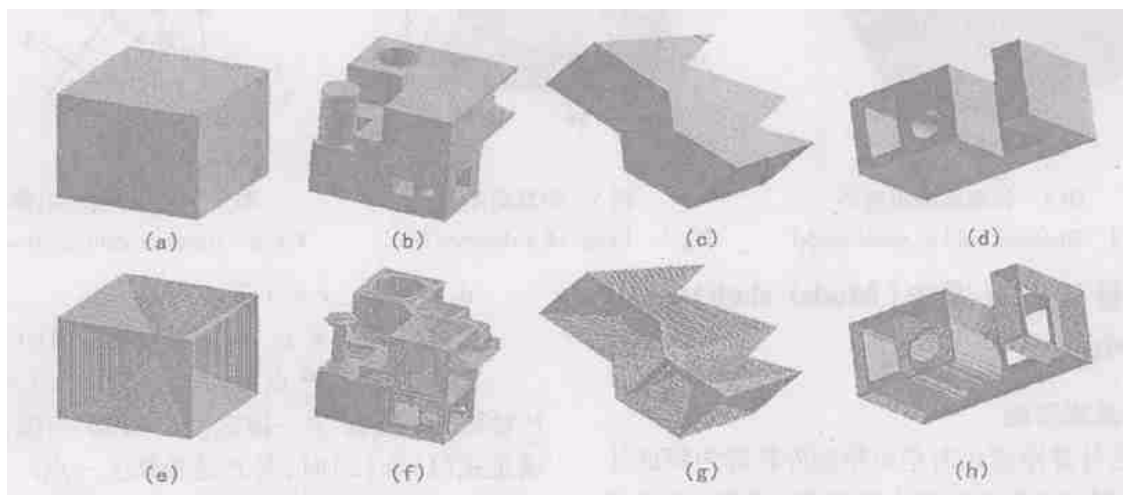


图 8 三维模型及模型骨架

Fig. 8 3D models and skeleton models

变换法计算出体素模型的距离场, 然后根据骨架体素的 26 连通域中体素的对称性提出了模型骨架提取算法, 最后通过实验验证了算法的有效性. 利用该

算法得到的骨架模型表示, 可以反映物体的本质结构特征, 它不受物体平移、旋转和比例变换的影响,

(下转第 693 页)