

Lidar点云三维模型于Morse理论下特征提取及应用

游晨宇, 张春亢*, 张亚宁, 王朝

贵州大学矿业学院, 贵州 贵阳

收稿日期: 2022年11月23日; 录用日期: 2022年12月16日; 发布日期: 2022年12月27日

摘要

针对传统的特征提取技术特征提取粗略, 拓扑信息大量丢失, 拓扑关系难以简化等问题, 本文实现了基于分段线性Morse理论的特征提取算法, 确定了一种新特征线度量指标。首先以三角网格顶点曲率计算为基础, 构建了三维表面模型的Morse理论指标函数; 采用最大(小)邻点算法连接指标函数所提取特征点, 完成特征线构建; 针对Morse-Smale复形在三维表面模型中冗余或错误特征过多, 采用单复形拓扑模型进行特征提取; 以三维表面模型Morse单复形“持续值法”思想为参照, 确定了一种点线结合特征线提取度量指标, 并基于该指标完成特征线拓扑简化。实验结果表明, 对棱角线完整性和存在性存在关键作用, 在零件模型点云压缩率为26.02%, 在苹果模型点云压缩率为39.33%, 提高了拓扑特征提取效率, 为点云后续处理奠定良好基础。

关键词

分段线性Morse理论, 曲率, 持续值, 拓扑特征, 提取与简化

Lidar Point Cloud 3D Model for Feature Extraction and Application Based on Morse Theory

Chenyu You, Chunkang Zhang*, Yaning Zhang, Chao Wang

College of Mining, Guizhou University, Guiyang Guizhou

Received: Nov. 23rd, 2022; accepted: Dec. 16th, 2022; published: Dec. 27th, 2022

Abstract

In response to the problems of rough feature extraction, massive loss of topological information,

*通讯作者。

and difficulty in simplifying topological relationships by traditional feature extraction techniques, this study implements a feature extraction algorithm based on segmented linear Morse theory and determines a new feature line metric. The Morse index function of the 3D surface model is constructed based on the calculation of the triangular mesh vertex curvature; the maximum (small) neighborhood algorithm is used to connect the extracted feature points of the index function to complete the construction of the feature line; in view of the excessive redundant or wrong features of the Morse-Smale complex in the 3D surface model, the single complex topological model is used for feature extraction; the 3D surface model is used as the "Morse single complex" continuous model. The Morse single complex shape "continuous value method" is used as a reference, and a point-line combination feature line extraction metric is determined. And based on this index, the topological simplification of the characteristic line is completed. The experimental results show that it has a key effect on the integrity and existence of angular lines, and the compression rate of the point cloud is 26.02% in the part model and 39.33% in the apple model, which improves the efficiency of topological feature extraction and lays a good foundation for the subsequent processing of the point cloud.

Keywords

Segmented Linear Morse Theory, Curvature, Persistence Value, Topological Characteristics, Extraction and Simplification

Copyright © 2022 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

三维激光扫描技术为三维建模提供了丰富的三维空间信息,已成为三维建模的重要数据来源[1]。常用于数字孪生城市,逆向工程和文物保护等模型重建中[2] [3] [4]。三维激光扫描技术扫描点云的数量巨大、冗余程度过高,难以满足实际建模需求,因此一种能有效减少点云数量,并保证特征的精确性、完整性和拓扑信息的一致性的三维点云特征提取算法是建模前急需解决的关键问题。

对于模型拓扑特征提取技术,众多学者结合不同的数据类型和模型,在不同角度进行了研究。文献[5]结合图像学和数学思想,利用曲面上定义的累积热核函数提取曲面关键点,并使用曲面特征检测技术交互式选定边缘特征点,完成文物修复的片状缺块和跨区域缺块补配特征点提取,但变形剧烈模型其误差较大。文献[6]基于随机抽样一致算法直接进行3D点云数据分析,该算法抗噪性抗干扰性强,但提取精度有待提高,可采用更适合限制条件提高捕捉面积和形状特征的能力。文献[7]基于激光雷达点云数据的数字地面模型(DTM),提出一种圆环探测法,利用堤防特殊形态特征和圆环的关联性,完成堤防中心线构造,该算法的应用广泛性和可移植性较差。文献[8]采用相邻点几何结构特征关系的线性截距比检测特征点,由于相邻点线性截距比的有序性,通过一次计算即可确定特征点,计算量小且速度快,但对于球面等特殊曲面会产生局部误差。文献[9]将数学形态学中定义的梯度值作为特征点检测指标,使用局部邻域梯度均值为阈值获取特征点,该算法计算简单,计算机资源需求小,但损失了大量的拓扑结构信息。文献[10]融合Lidar数据和高分影像,使用SegNet语义模型实现建筑物粗提取,并将阈值分割后高分影像光谱特征信息作为建筑物精提取的约束条件,完成模型特征提取,但高分影像的部分光谱特征信息严重制约提取精度。文献[11]提出了单复形模型,仅以下降Morse复形进行特征提取,提高了特征提取效率,避免了无实际意义特征的提取,但部分棱角线仍存在断裂问题。文献[12]实验表明三维表面模型极小

点与下降线及上升 Morse 复形对于特征提取无实际作用, 且增加了特征提取难度。文献[13]提取了部分拓扑特征, 但存在毛刺附加特征过多。

针对于上述算法无法完整保留拓扑结构信息且存在冗余或错误特征等局限性, 本文使用曲率作为 Morse 函数指标获取棱线特征点和特征线, 且以单复形模型为基础, 重新确定了一种点线结合特征度量指标, 涵盖特征点和特征线两者优势, 实现拓扑特征提取的简化表达, 最后对该算法进行了有效验证和分析。

2. Morse 理论

20 世纪初 Morse H.M. 基于对连续光滑流形结构研究提出了 Morse 理论, 该理论主要是研究 n 维空间内的 d 维流形 M (M 属于 R 的 n 维度) 的形状和定义[14] [15]。由于该理论主要思想是将拓扑结构和 Morse 映射函数集合结合起来定量分析, 以此定义特征点并判断其点类型, 最后来构造特征线, 因此又被称为关键点理论或临界点理论[16]。该理论对于定义在二维光滑流体 M 上二阶可微函数 $f(x, y)$ 梯度为:

$$\nabla f = \left(\frac{\partial f}{\partial x}, \frac{\partial f}{\partial y} \right) \quad (1)$$

$$H_f = \begin{pmatrix} \frac{\partial^2 f}{\partial x^2} & \frac{\partial^2 f}{\partial x \partial y} \\ \frac{\partial^2 f}{\partial x \partial y} & \frac{\partial^2 f}{\partial y^2} \end{pmatrix} \quad (2)$$

如公式(2), 根据海塞矩阵 H_f 在该点在某个方向上的负特征值及变化梯度作为判断依据将关键点分为极大值点, 极小值点和鞍点三类, 是 Morse 理论的基础要素。极大值点和鞍点连线为上升线, 极小值点和鞍点连线为下降线。Morse 理论核心是 Morse-Smale 复形, 复形分为上升复形和下降复形, 两种复形区别在于构造复形特征线变化趋势。由于二维地表模型的 Morse-Smale 复形能完整表达地表趋势[17], 其先应用于地表形态。Morse 理论特征提取由三维地形模型拓展迁移为三维表面模型, 判定要求和标准都有对应迁移, 三维模型采用表面凸凹点对应地形模型峰谷点并使用关键点曲率变化来迁移地面模型高程变化, 其仍具有良好提取效果。

3. 基于 Morse 理论拓扑特征提取

3.1. 特征点提取

三维表面模型网格上顶点的曲率值或法方向矢量变化值为拓扑特征提取一个重要函数指标, 曲率值为曲面顶点二阶微分值, 法方向矢量变化值为曲面顶点一阶微分值, 顶点法向量变化值计算比顶点曲率计算更简便高效, 但顶点曲率能更全面反映该顶点在曲面上局部变化趋势和几何性质, 因此对关键点判别更具重要积极意义。三维空间曲率理论表明顶点曲率绝对值越大, 该点附近曲面变化趋势越大, 反之, 曲面变化趋势越小。本文以 Morse 理论为基础, 定义 Delaunay 三角网格上顶点的曲率值为 Morse 理论指标函数, 将其作为关键点检测函数。三角网格顶点曲率计算可先在顶点 P 处建立曲面一般通用公式 $F(m, n) = (m, n, H(m, n))$, 其中可设 $H(m, n) = am^2 + bmn + cn^2$ 。以顶点 P 为中心局部坐标系下, 根据点 P 的 t 个邻点 (m_t, n_t, h_t) 得到线性方程组为:

$$\begin{bmatrix} m_1^2 & m_1 n_1 & n_1^2 \\ m_2^2 & m_2 n_2 & n_2^2 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ m_t^2 & m_t n_t & n_t^2 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} a \\ b \\ c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_1 \\ h_2 \\ \vdots \\ h_t \end{bmatrix} \quad (3)$$

最小二乘线性方程组解法主要有 QR 分解法和奇异值分解法, QR 分解法更适用于矩阵行数 m 远远大于列数 n 线性方程组, 依据实际情况采用奇异值分解法更为合适。分解如公式(4)所示:

$$A\bar{x} = U\Sigma V^T \cdot \bar{x} = \bar{h} \quad (4)$$

主曲率 k_1, k_2 计算公式分别为:

$$k_1 = a + c - \sqrt{(a-c)^2 + b^2} \quad (5)$$

$$k_2 = a + c + \sqrt{(a-c)^2 + b^2} \quad (6)$$

Morse 理论将三角网格顶点分为关键点和正则点, 而关键点分为极小值点、鞍点和极大值点。以关键点检测函数为基础, 使用邻点比较法选取关键点, 定义比较点 P 与其邻点 P_i 特征属性值之差为 D_i , 按序排列邻点的差值符号变化数为 SV , 理论分析可知, SV 必为偶数或者 0。若比较点 P 特征属性值均大于其邻点 P_i 特征属性值, 即特征属性差值 $D_i > 0$, 且符号变化数 $SV = 0$, 比较点 P 为极大值点; 若比较点 P 特征属性值均小于其邻点 P_i 特征属性值, 即特征属性差值 $D_i < 0$, 且符号变化数 $SV = 0$, 比较点 P 为极小值点; 若比较点 P 特征属性值仅大于其部分邻点 P_i , 即特征属性差值 D_i 有正有负, 符号变化数 $SV = 2$ 时, 比较点 P 为正则点, 如果符号变化数 SV 为 4 及其以上偶数, 比较点 P 为鞍点。通过此种方法, 即可提取网格中关键点和正则点。

3.2. 特征线和复形提取

三维表面模型特征线提取是 Morse 复形构建和模型特征提取关键步骤, 将 Morse 理论指标函数获取关键点按算法顺序连接可构建完成特征线。基于边界的复形提取算法沿上升特征线和下降特征线连接构成 Morse 复形, 奠定复形拓扑简化基础。

基于三角网格常用的特征线提取算法有三种: 最大(小)邻点法、最大角度法和梯度法。三维空间角度计算参考平面选择不固定, 最大角度法计算较为复杂, 耗费时间多; 梯度法理论上最理想, 选择三角形内上升或下降最优线, 但会分割三角形, 计算量过大; 最大(小)邻点法通过比较顶点 P 各邻点 P_i 特征属性值, 选择其中属性值最大(小)邻点作为特征线下一个构成点, 算法简便, 计算效率高。充分利用 Morse 理论指标函数, 以提取特征点的特征属性值为基础, 采用最大(小)邻点法构建特征线, 可最大限度节约提取时间, 提高构建效率, 因此本文采用了该方法提取特征线。上升特征线和下降特征线提取都以鞍点为起始点, 使用最大(小)邻点法, 比较鞍点各邻点属性值, 选取邻点中特征属性值极大(极小)的点为上升线(下降线)下一构成点, 不断以特征线末端构成点为中心点, 选取其符合要求邻点加入特征线末端, 当特征线末端点为三角网格极大点(极小点)时, 算法终止。构成 Morse 复形特征线区别将 Morse 复形分为上升复形和下降复形, 上升复形由下降特征线组成, 下降复形由上升特征线组成。理论分析发现, 三维表面模型上升复形对模型拓扑特征提取无实际作用, 因此本文仅构建下降 Morse 复形用于拓扑特征提取。

3.3. 拓扑特征简化

基于 Morse 理论单复形特征提取算法敏感性较高, 导致可能提取部分错误特征或冗余无意义特征, 产生噪声影响特征提取精确度, 因此利用拓扑特征简化降低噪声, 提高模型特征提取精确度。目前主流的特征重要性度量算法分为基于特征点和基于特征线两类。经典“关键线持续值”法应用广泛, 以特征线为基础对于复形拓扑特征简化更具意义, 其特征重要性为:

$$D(p_i) = \begin{cases} F(p_i) - \max(F(p_i)) \\ \min(F(p_i)) - F(p_i) \end{cases} \quad (7)$$

公式(7)中, $D(p_i)$ 为关键线上点 p_i 的特征重要性值; $\max(F(p_i))$ 为与点 p_i 相连的鞍点连接的极小点中较大点; $\min(F(p_i))$ 为与点 p_i 相连的鞍点连接的极大点中较小点。其计算 Morse 复形特征重要性度量指标为:

$$I_i = \sum_1^n Di / n \quad (8)$$

经典算法仅适用于 Morse-Smale 复形, 文献[11]推导出适用于单复形模型的“持续值”法, 其特征重要性为:

$$D(p_i) = F(p_i) - \max(F(p_i)) \approx F(p_i) \quad (9)$$

本文参照单复形模型“持续值”法, 从二维平面模型特征线重点为斜率值引申到三维立体模型线长和曲率, 使用了一种特征点和特征线相结合的 Morse 复形特征重要性度量指标, 定义为:

$$I_l = (D_1L_1 + D_2L_2 + \dots + D_nL_n) / n \quad (10)$$

点线结合特征重要性度量指标中线段长度值 L 和线段两端点曲率值 D 都很大, 表示在该线段区域特征性很强, 与三维表面模型拓扑特征相符合; 反之, 两者都小同样符合拓扑特征。该度量指标可有效判别特征重要性, 有效增加提取精度。

4. 实验与分析

本文实现硬件基础为 AMD R7 4800U 处理器和 16G 内存电脑, 软件基础使用 C++ 语言于 Visual Studio 2019 进行算法验证, 实验所使用点云网片模型如图 1(a)和图 1(b)。对两种模型分别进行本文方法和文献[13]方法提取特征, 图 2(a)和图 3(a)为文献[13]方法提取, 图 2(b)和图 3(b)为本文方法提取。

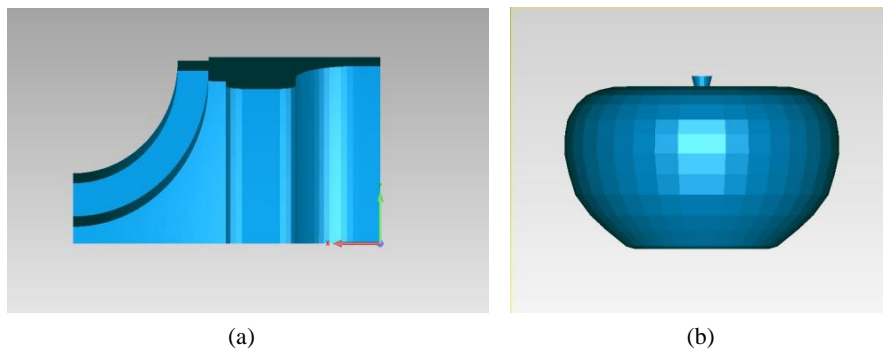


Figure 1. Model point cloud network diagram. (a) Part model; (b) Apple model
图 1. 模型点云网片图。(a) 零件模型; (b) 苹果模型

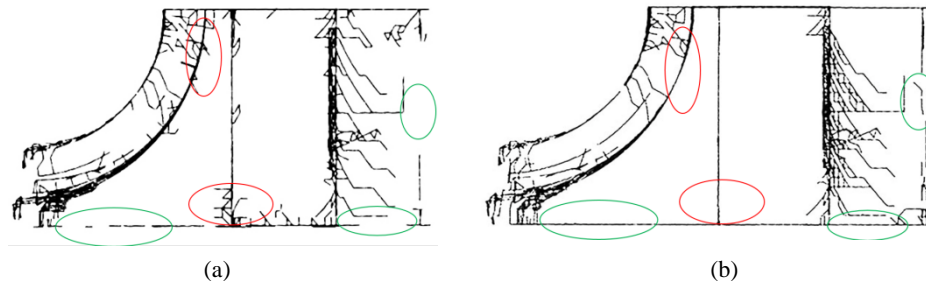


Figure 2. Feature extraction of part model. (a) Reference [13]; (b) This paper method
图 2. 零件模型特征提取图。(a) 文献[13]; (b) 本文方法

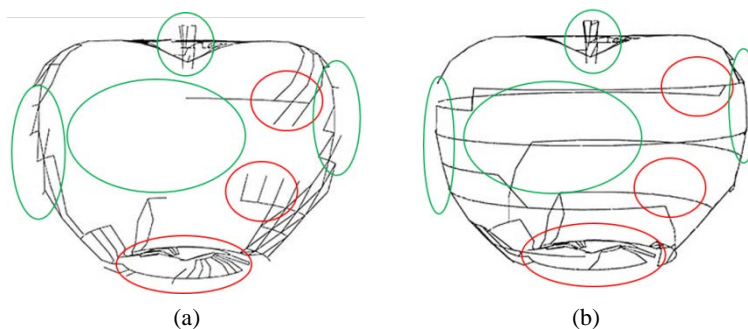


Figure 3. Feature extraction of apple model. (a) Reference [13]; (b) This paper method
图 3. 苹果模型特征提取图。(a) 文献[13]; (b) 本文方法

由图 2 和图 3 可知, 文献[13]所实现算法对于特征提取存在关键棱角线毛刺过多, 关键线断裂和丢失关键特征等问题。图 2(a)显示, 红色椭圆形标记位置出现毛刺过多, 绿色框处可看到关键线断裂及拓扑特征丢失, 图 2(b)红色椭圆框对应位置无棱角毛刺的出现, 绿色框处拓扑特征线未出现断裂和丢失情形。图 3(a)和图 3(b)绿色椭圆形框处的关键特征缺失、断裂更具对比性, 红色标记处也更能体现冗余和特征毛刺去除功能。

对于零件模型, Morse 函数指标敏感性过高导致拓扑特征提取过程中曲面上产生了过多和冗余, 于图 2(b)的右侧部分和左上部分体现; 对于苹果模型, 由于苹果本身不是规则的圆柱体, 所提取拓扑关键特征线即为图 3(b)所示。本文算法将经典持续值变式为采用新度量指标持续值法, 对零件模型和苹果棱角关键拓扑特征提取有更具积极重要性, 对棱角线完整性和存在性存在关键作用, 在零件模型点云压缩率为 26.02%, 在苹果模型点云压缩率为 39.33%。

5. 结论

三维模型特征提取对三维建模的多个领域方向有重要影响, 本文采用一种新 Morse 函数指标, 使用基于新度量指标的变种持续值方法, 实现了 Morse 理论下三维模型拓扑特征提取和简化。根据拓扑特征提取结果可知, 本文算法在三维模型棱角线提取精度和抗干扰性有良好作用, 本文算法克服了三维模型 Morse 过度剖分问题, 加深了模型表达程度, 减少了点云模型数据量, 提高了拓扑特征提取效率, 但对特殊三维表面去除毛刺冗余效果有待进一步优化。

基金项目

国家自然科学基金项目(41701464)、贵州大学培育项目(贵大培育[2019]26 号)、中国科学院战略性先导科技专项子课题(XDA2806020101)。

参考文献

- [1] 李红梅, 张春亢, 张霞, 等. Morse 理论支持下的建筑物点云特征提取[J]. 测绘通报, 2020(5): 31-35+42.
- [2] 姚明镜, 唐璇, 张春良, 等. 基于逆向工程和 FDM 技术的塑料产品设计与应用[J]. 塑料科技, 2020, 48(12): 45-48.
- [3] 龙丽娟, 夏永华, 黄德. 一种基于三维激光扫描点云数据的变电站快速建模方法[J]. 激光与光电子学进展, 2020, 57(20): 202801.
- [4] 骆社周, 习晓环, 王成. 激光雷达遥感在文化遗产保护中的应用[J]. 遥感技术与应用, 2014, 29(6): 1054-1059.
- [5] 魏明强, 陈红华, 孙杨杏, 等. 破损文物数字化修复: 以中国出土青铜器为例[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2021, 33(5): 789-797.
- [6] Ghahremani, M., Williams, K., Corke, F., *et al.* (2021) Direct and Accurate Feature Extraction from 3D Point Clouds

of Plants Using RANSAC. *Computers and Electronics in Agriculture*, **187**, Article ID: 106240.
<https://doi.org/10.1016/j.compag.2021.106240>

- [7] 沈定涛, 钱天陆, 夏煜, 等. 机载 LiDAR 数据提取堤防工程特征信息圆环探测法[J]. 测绘学报, 2021, 50(2): 203-214.
- [8] Fu, S.Y. and Wu, L.S. (2019) Feature Line Extraction from Point Clouds Based on Geometric Structure of Point Space. *3D Research*, **10**, 16. <https://doi.org/10.1007/s13319-019-0227-x>
- [9] 邓博文, 王召巴, 金永, 等. 基于形态学梯度的激光扫描点云特征提取方法[J]. 激光与光电子学进展, 2018, 55(5): 239-245.
- [10] 郭峰, 毛政元, 邹为彬, 等. 融合 LiDAR 数据与高分影像特征信息的建筑物提取方法[J]. 地球信息科学学报, 2020, 22(8): 1654-1665.
- [11] 张春亢, 李红梅, 张霞. 非对偶性点云拓扑特征识别与过渡特征保护[J]. 光学精密工程, 2020, 28(10): 2301-2310.
- [12] 邱彦杰, 周雄辉. 反向工程中三角网格的加工特征识别[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2010, 22(4): 711-716.
- [13] Sahner, J., Weber, B., Prohaska, S., *et al.* (2008) Extraction of Feature Lines on Surface Meshes Based on Discrete Morse Theory. *Computer Graphics Forum*, **27**, 735-742. <https://doi.org/10.1111/j.1467-8659.2008.01202.x>
- [14] Milnor, J. (1963) Morse Theory. Princeton University Press, Princeton, 1-37.
- [15] 刘俊, 刘希玉. 基于广义离散 Morse 理论的强关联规则挖掘[J]. 计算机工程, 2011, 37(16): 45-47.
- [16] 袁洁, 周明全, 耿国华, 等. 基于 Morse-Smale 拓扑特征的文物碎片拼接算法[J]. 自动化学报, 2018, 44(8): 1486-1495.
- [17] 刘梦婷, 方美娥, 张楠, 等. 连续框架下二维标量场 Morse-Smale 复形分割[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2016, 28(12): 2075-2081.