

黎万波, 廖益龙, 徐坤财, 等. 离散网格顶点法矢量估算方法对比分析[J]. 智能计算机与应用, 2024, 14(10): 218-221.
DOI: 10.20169/j.issn.2095-2163.241032

离散网格顶点法矢量估算方法对比分析

黎万波, 廖益龙, 徐坤财, 李元会, 张宁

(贵阳信息科技学院 智能工程系, 贵阳 550025)

摘要: 通过梳理离散网格顶点矢量估算方法的研究现状, 发现对离散网格顶点矢量估算方法缺少精确度评价指标, 相关领域的学者面临难以选择计算方法的问题。对此, 设计提出了一种离散网格顶点矢量的定量对比分析方法。通过对比实验结果证明, 夹角修正法在同类方法中具有更高的精度和稳定性, 为相关领域的研究人员选择顶点矢量计算方法提供了理论指导。

关键词: 离散网格; 顶点; 法矢量; 定量评价; 对比分析

中图分类号: TP391

文献标志码: A

文章编号: 2095-2163(2024)10-0218-04

Comparative analysis of vertex normal vector estimation methods in discrete grid

LI Wanbo, LIAO Yilong, XU Kuncai, LI Yuanhui, ZHANG Ning

(Department of Intelligent Engineering, Guiyang Institute of Information Science and Technology, Guiyang 550025, China)

Abstract: By combing the current research status of discrete mesh vertex vector estimation methods, it is found that there is a lack of accuracy evaluation indexes for discrete mesh vertex vector estimation methods, and scholars in the related fields face the problem of difficulty in choosing calculation methods. In this regard, a quantitative comparative analysis method of discrete mesh vertex vector is designed and proposed. The results of comparison experiments prove that the pinch angle correction method has higher accuracy and stability among similar methods, which provides theoretical guidance for researchers in related fields to choose vertex vector calculation methods.

Key words: discrete grid; vertex; normal vector; quantitative evaluation; comparative analysis

0 引言

随着计算机辅助设计^[1]、逆向工程^[2]相关技术的发展, 三角离散网格模型^[3]凭借其易获取、易建立拓扑关系^[4]等优点, 被广泛应用于航空、航天^[5]、船舶制造^[6]、汽车制造^[7]、三维重建^[8]等工业领域。三角离散网格模型的功能在于通过离散网格曲面模型^[9]逼近连续曲面模型^[10]。离散网格面的几何信息将用于其逼近的连续模型的模型光滑^[11]、曲率计算^[12]、模型重构^[13]、模型分割^[14]等。由此可知, 三角离散网格的几何信息的精确计算至关重要。

目前, 针对三角离散网格顶点法矢量^[15], 不同的计算方式被相继提出。其中, Gouraud^[16]认为顶点法矢量与其所在的所有三角形的面法矢量相关。

Taubin^[17]认为顶点法矢量与其所在的所有三角形的面法矢量和三角形的面积相关。Grit等学者^[18]提出的夹角修正法认为顶点法矢量与其所在的所有三角形的面法矢量和三角形的顶角相关。神会存等学者^[19]提出的面积角度法是在夹角修正法的基础上考虑了顶点所在三角形的面积。彭育辉等学者^[20]提出的形状参数法认为顶点法矢量与其所在三角形的形状相关, 并在计算公式中引入了形状参数。肖和等学者^[21]提出的形状因子法同样认为顶点法矢量与其所在三角形的形状相关, 并在计算公式中引入了形状因子。

综观上述方法可知, 其共同之处在于不同学者认为几何关系描述的差异性对顶点曲率估计值存在影响。但在实际应用中采用何种方法的精度更好,

基金项目: 产教融合背景下智能制造专业群人才培养模式构建(2022JG021)。

作者简介: 廖益龙(1986-), 男, 讲师, 主要研究方向: 自动化控制; 徐坤财(1997-), 男, 助教, 主要研究方向: 图像处理技术; 李元会(1983-), 女, 讲师, 主要研究方向: 自动化控制; 张宁(1993-), 男, 助教, 主要研究方向: 人工智能技术。

通讯作者: 黎万波(1998-), 男, 助教, 主要研究方向: 智能制造技术。Email: liwanbo2020@163.com

收稿日期: 2024-04-07

适应性更强则是目前至关重要的研究问题。因此, 本文设计了一套定量分析顶点矢量的实验方法, 用于测试不同方法在同种离散模型上的顶点矢量估算情况, 为后续相关领域学者选择顶点矢量计算方法提供指导。

1 不同顶点矢量估算方式说明

根据上述文献的内容, 统计出不同顶点矢量估算方法对应的计算公式。

(1) Gouraud 法。具体公式如下:

$$\mathbf{n} = \frac{\sum_{i=1}^k \mathbf{n}_i}{\|\sum_{i=1}^k \mathbf{n}_i\|} \quad (1)$$

(2) Taubin 法。具体公式如下:

$$\mathbf{n} = \frac{\sum_{i=1}^k A_i \mathbf{n}_i}{\|\sum_{i=1}^k A_i \mathbf{n}_i\|} \quad (2)$$

(3) 夹角修正法。具体公式如下:

$$\mathbf{n} = \frac{\sum_{i=1}^k \alpha_i \mathbf{n}_i}{\|\sum_{i=1}^k \alpha_i \mathbf{n}_i\|} \quad (3)$$

(4) 面积角度法。具体公式如下:

$$\mathbf{n} = \frac{\sum_{i=1}^k A_i \alpha_i \mathbf{n}_i}{\|\sum_{i=1}^k A_i \alpha_i \mathbf{n}_i\|} \quad (4)$$

(5) 形状参数法。具体公式如下:

$$\mathbf{n} = \frac{\sum_{i=1}^k \frac{(1 - \delta_i) \alpha_i \mathbf{n}_i}{A_i}}{\|\sum_{i=1}^k \frac{(1 - \delta_i) \alpha_i \mathbf{n}_i}{A_i}\|} \quad (5)$$

(6) 形状因子法。具体公式如下:

$$\mathbf{n} = \frac{\sum_{i=1}^k \lambda_i A_i \mathbf{n}_i}{\|\sum_{i=1}^k \lambda_i A_i \mathbf{n}_i\|} \quad (6)$$

其中, \mathbf{n} 表示顶点法矢量; δ_i 表示形状参数; λ 表示形状因子, 计算方法如下所示:

$$\delta_i = \frac{1}{2} (\cos \alpha_i - \cos \beta_i) \quad (7)$$

$$\lambda = \frac{(a + b - c)(b + c - a)(c + a - b)}{abc} \quad (8)$$

顶点法矢量估算的依据是顶点所在三角面片及其邻接三角面片的面法矢量与顶点的几何关系。如图 1 所示。图 1 表现了不同顶点法矢量计算方法中点 P 的法矢量 \mathbf{n} 与其所有邻接三角面片相关参数的几何关系。

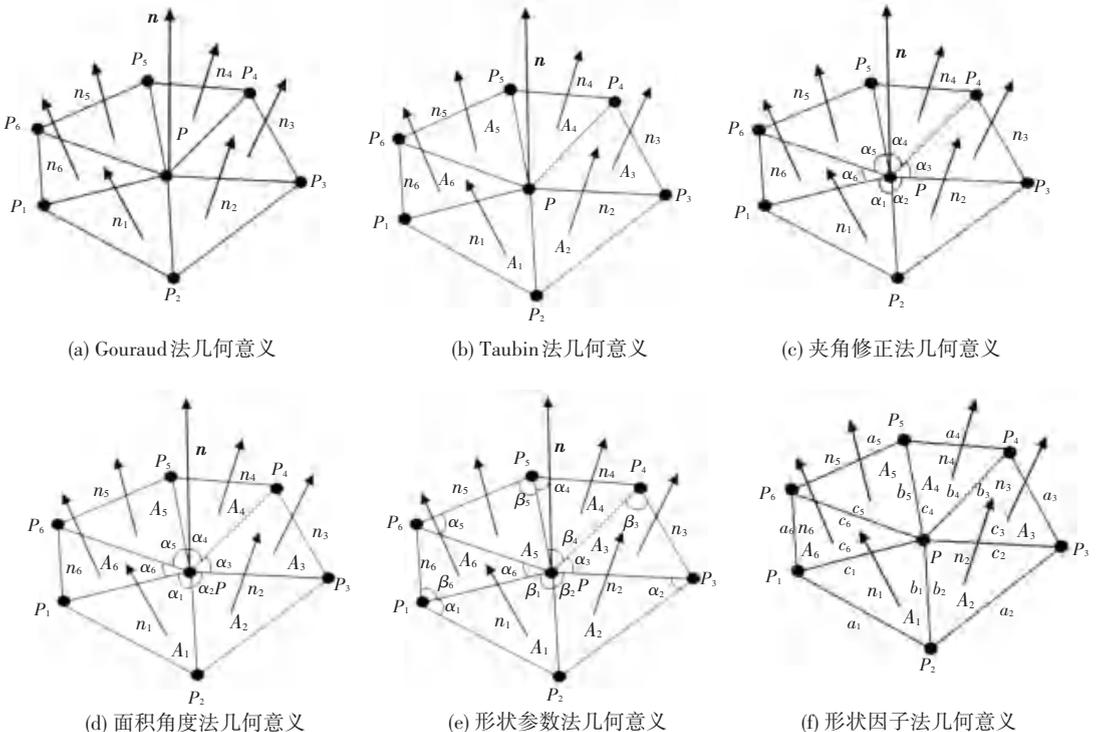


图 1 各方法中参数的几何意义

Fig. 1 Geometric meaning of parameters in each method

图1中,法矢量 $n_i(i=1,2,3,4,5,6)$ 表示顶点 P 邻接三角形的面法矢量, $A_i(i=1,2,3,4,5,6)$ 表示邻接三角形的面积。夹角修正法和面积角度法中, $\alpha_i(i=1,2,3,4,5,6)$ 表示顶点 P 在邻接三角形中所对应的顶角。形状参数法中, $\alpha_i(i=1,2,3,4,5,6)$ 和 $\beta_i(i=1,2,3,4,5,6)$ 分别表示顶点 P 的邻接三角形的最小内角和最大内角。形状因子法中, $a_i(i=1,2,3,4,5,6)$ 、 $b_i(i=1,2,3,4,5,6)$ 、 $c_i(i=1,2,3,4,5,6)$ 分别表示顶点 P 的邻接三角形的边长。

2 实验方案设计

顶点法矢量作为后续计算方法中的重要组成部分,其计算精度对后期连续模型的几何参数计算有很大的影响。为了提升后续使用顶点平均曲率的精度,需对上述的法矢量计算方法进行定量分析,以确定最实用的顶点法矢量计算方法。因此,本文设计了如下实验,用于对比不同计算方法的精确性。

不同顶点法矢量计算方法的性能对比实验方案如下:

(1)首先确定出顶点法矢量的标准参考值。实验引入了2种常见的二次曲面作为参考标准,分别是球面和椭球面,表达式如下:

$$\begin{cases} \text{球面: } x^2 + y^2 + z^2 = 100 \\ \text{椭球面: } \frac{x^2}{100} + \frac{y^2}{25} + \frac{z^2}{25} = 1 \end{cases}$$

从数学的基本理论可知,这2种二次曲面模型的理论法矢表达式如下所示,以此作为顶点法矢量的标准参考值:

$$\begin{cases} \text{球面法矢: } (x, y, z) \\ \text{椭球面法矢: } (\frac{x}{100}, \frac{y}{25}, \frac{z}{25}) \end{cases}$$

表1 不同方法的误差统计结果

Table 1 Statistical error results of different methods

曲面模型	顶点数量	误差统计量	Gouard 法	Taubin 法	夹角修正法	面积角度法	形状修正法	形状面积法
球面	3 083	γ_{\max}	0.022 7	0.027 9	0.018 1	0.018 9	0.018 2	0.034 0
	3 083	t_γ	0.013 7	0.014 0	0.013 7	0.013 7	0.013 7	0.014 4
	3 083	σ_γ	0.003 8	0.003 6	0.003 6	0.003 7	0.003 7	0.005 2
椭球面	3 038	γ_{\max}	0.022 8	0.042 7	0.013 4	0.027 2	0.027 2	0.045 5
	3 038	t_γ	0.013 9	0.037 4	0.051 0	0.039 6	0.039 6	0.086 1
	3 038	σ_γ	0.003 7	0.007 1	0.001 9	0.001 8	0.001 8	0.001 8

根据表1中数据分析可知,通过对夹角误差最大值 γ_{\max} 、夹角误差平均值 t_γ 以及夹角误差标准差

(2)通过计算机辅助设计软件建立的球面和椭球面的三角网格模型如图2所示。通过软件开发平台将文中的不同估算方法程序化,分别导入球面和椭球面模型计算对应的顶点法矢量值。

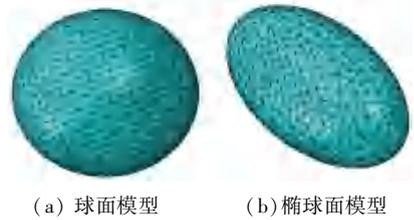


图2 三角网格模型

Fig. 2 Traingular mesh model

(3)确定精度评价指标。本文将顶点的理论法矢量 n_i 与不同方法估算的实际法矢量 n 之间的夹角误差 γ ,作为评价不同方法估算精度的指标,如图3所示。

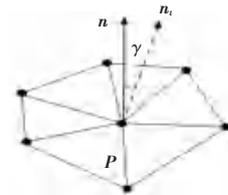


图3 顶点估算法矢与理论法矢夹角示意图

Fig. 3 Schematic diagram of the angle between the vertex estimate normal vector and the theoretical normal vector

3 结果与讨论

实验过程中统计了每种方法对球面和椭球面上所有的顶点法矢量计算结果夹角误差的最大值 γ_{\max} 、夹角误差的平均值 t_γ 、以及夹角误差的标准差 σ_γ 。3个统计量分别反映了不同顶点矢量估算方法的误差范围、总体情况和波动情况。实验结果见表1。

σ_γ 这3个统计量的综合分析结果表明,对于球面采用夹角修正法的夹角误差最大值 γ_{\max} 为0.018 1,夹

角误差平均值 t_γ 为 0.013 7, 夹角误差标准差 σ_γ 为 0.003 6, 3 个误差统计值均为 6 种顶点法矢量估计方法中同类统计量的最小值。对于椭球面来说, 采用夹角修正法的夹角误差最大值 γ_{\max} 为 0.013 4, 夹角误差平均值 t_γ 为 0.051 0, 夹角误差标准差 σ_γ 为 0.001 9。其中, 夹角误差最大值 γ_{\max} 为同类统计量最小值, 夹角误差标准差 σ_γ 为同类统计量的次小值。

4 结束语

本文利用可计算理论法矢量的离散模型作为参考标准, 对常见的离散网格模型顶点法矢量计算方法进行了定量对比分析。通过实验结果的分析, 说明了夹角修正方法对于离散网格模型顶点矢量估算的精度和稳定性均高于其他常用方法, 为后续相关领域的研究人员选择顶点矢量计算方法提供了理论依据。

参考文献

[1] 李穗, 马雯洁, 王时敏, 等. 上前牙种植单冠修复体切端的数字化设计正确度[J]. 北京大学学报(医学版), 2024, 56(1): 81-87.

[2] 黎创, 赵晓敏, 邹波, 等. 数字化扫描结合逆向工程技术在全冠牙体预备教学中的应用评价[J]. 中华医学教育探索杂志, 2024, 23(1): 78-83.

[3] 郭宇飞, 孙科武, 赵荣利, 等. 面向离散模型的 B-rep 构建、特征简化及网格生成方法[J]. 中国科技论文, 2023, 18(4): 449-454.

[4] 魏永超, 朱泓超, 徐未其, 等. 基于联动空间拓扑关系的步态识别研究[J]. 现代计算机, 2024, 30(2): 10-17, 38.

[5] 黄文恺, 梁智洪, 王明华, 等. 数字孪生在航空航天结构的设计、

制造和运维中的应用与展望[J]. 图学学报, 2024, 45(2): 241-249.

[6] 肖嘉豪, 富威, 刘鑫宇, 等. 基于数字孪生的船舶制造车间管理系统[J]. 应用科技, 2024, 51(3): 7-14.

[7] 张雨, 黄润才. 文本挖掘在新能源汽车领域中的应用[J]. 智能计算机与应用, 2023, 13(6): 84-89.

[8] 周震, 姜笑言, 韩家哺. 基于三维点云的双机器人协作打磨轨迹规划研究[J]. 智能计算机与应用, 2023, 13(1): 77-83.

[9] 王金鑫, 禄丰年, 陈杰. 球面离散网格与球体离散网格的比较研究[J]. 测绘科学, 2012, 37(6): 34-36.

[10] 钟国宇, 高健, 文豪. 面向三角网格模型数控加工的研究现状分析[J]. 机床与液压, 2012, 40(17): 144-147.

[11] 刘斌, 林俊义, 黄常标, 等. 网格曲面上两相离曲线段的光滑过渡[J]. 计算机集成制造系统, 2013, 19(3): 468-473.

[12] 成勇龙, 张爱军, 付国. 矩形截面钢筋混凝土柱极限曲率计算研究[J]. 建筑科学, 2023, 39(9): 19-28.

[13] 丁永峰, 贺晓辉, 张杰, 等. 基于 Geomagic Studio 的冲浪板曲面模型重构[J]. 机电工程技术, 2023, 52(7): 99-102.

[14] 耿国华, 石晨晨, 魏潇然, 等. 3D 打印中的模型分割与打包[J]. 光学精密工程, 2016, 24(6): 1439-1447.

[15] 刘庆伟, 李重光, 楼宇丽, 等. 双曲线顶点轴锥镜聚焦柱矢量光束的影响[J]. 中国激光, 2020, 47(4): 235-245.

[16] GOURAUD H. Continuous shading of curved surfaces[J]. IEEE Transactions on Computers, 1971, 6(6): 623-629.

[17] TAUBIN G. Estimating the tensor of curvature of a surface from a polyhedral approximation [C] // Proceedings of IEEE International Conference on Computer Vision (ICCV'95). Massachusetts, USA: IEEE, 1995: 902-907.

[18] GRIT T, CHARLES A W. Computing vertex normals from polygonal facets[J]. Journal of Graphics Tools, 1998, 3(1): 43-46.

[19] 神会存, 李建华, 周来水. 三角网格模型顶点法矢与离散曲率计算[J]. 计算机工程与应用, 2005, 41(26): 12-15.

[20] 彭育辉, 高诚辉. 基于形状修正的三角网格模型顶点法矢估算方法[J]. 中国图象图形学报, 2010, 15(1): 142-148.

[21] 肖和, 杨旭静, 郑娟. 离散三角网格模型顶点法矢量估算[J]. 计算机工程与应用, 2016, 52(19): 196-200.