

激光三角网格点云孔洞曲面修补方法

崔文¹, 陈辉^{1*}, 刘万泉²

¹上海电力大学自动化工程学院, 上海 200090;

²科廷大学计算机科学系, 澳大利亚 珀斯 6102

摘要 三维激光扫描点云在采集和处理后生成的三角化网格, 由于测量设备限制或模型自身形状特点常包含孔洞, 这类孔洞会给后续三维重建带来障碍。针对孔洞修补问题, 提出了一种激光三角网格曲面点云孔洞修补算法。首先对封闭孔洞通过遍历三角网格确定三角面片边界, 检测孔洞。其次基于最小角度法在孔洞多边形处快速生成新三角面片, 形成初始网格。然后融合最小二乘网络与径向函数隐式曲面, 利用最小二阶导数对曲面曲率进行最小化, 并与原始网格曲率变化趋势保持相同, 最终实现激光点云孔洞修补。实验结果表明, 与其他点云修补方法相比, 该方法降低了修补误差, 适用于多种三角网格模型孔洞修补。

关键词 激光光学; 三维激光扫描; 三角化网格; 检测孔洞; 曲率; 孔洞修补

中图分类号 TP391

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202158.2014002

Hole Surface Repairing for Laser Triangular Mesh Point Cloud

Cui Wen¹, Chen Hui^{1*}, Liu Wanquan²

¹College of Automation Engineering, Shanghai University of Electric Power, Shanghai 200090, China;

²Department of Computing Science, Curtin University, Perth 6102, Australia

Abstract Due to the limitation of measuring equipment or the shape characteristics of the model itself, the point cloud data in the triangulated grid generated by three-dimensional (3D) laser scanning point cloud often contains holes, which brings obstacles to the subsequent 3D reconstruction. Aimed at handling the problem of hole repairing, a hole surface repairing algorithm based on laser triangulation point cloud is proposed in this paper. First, the boundary of the triangular patch is determined by traversing the triangular mesh for the closed hole, and the hole is detected. Second, a new triangular patch is generated quickly at the hole polygon based on the minimum angle method to form the initial mesh. Third, the least square network and radial basis function implicit surface are combined. Besides, the curvature of the surface is minimized by using the minimum second derivative. The surface newly generated is consistent with the trend of the original mesh curvature. Finally, the hole repairing of laser point cloud is realized. Experimental results show that, compared with other point cloud repair methods, this method not only reduces the repair error, but also is suitable for hole repairing of various triangular mesh models.

Key words laser optics; three dimensions laser scanning; triangular mesh; hole detection; curvature; hole repairing

OCIS codes 140.3070; 060.4261; 100.3020; 240.6700

1 引言

三维激光扫描利用激光测距原理, 通过记录被

测物体表面大量密集点的三维坐标、尺寸和外形等几何信息, 可快速重建出被测目标的线、面、体等各种数据, 成为获取空间数据的一种重要技术手

收稿日期: 2020-11-01; 修回日期: 2020-12-04; 录用日期: 2020-12-14

基金项目: 国家自然科学基金(51705304)、上海市自然科学基金(20ZR1421300)

通信作者: *chenhui@shiep.edu.cn

段^[1-3],广泛应用于文物保护与修复、地面景观形体测定与评价、城市三维建模、农作物现代化监测与模型评估等领域^[4]。三角网格是常用的几何模型表示形式之一,三维激光扫描设备可输出被测复杂物体的三角网格模型。然而,由于目前设备自身限制,特别是复杂测量环境因素影响,如模具与模型曲面接触部分无法直接测量、被测物本身已有损坏、激光测量中视线遮挡等,导致所获得激光三维网格模型存在孔洞。孔洞的存在不仅使三维模型可视化受限,而且对后续三维重建及处理造成严重阻碍^[5],如对被测物进行三维尺寸分析时,孔洞会影响分析的准确性,对模型进行快速制造时要求三维模型具有封闭结构。因此,激光点云三角网格孔洞修补具有重要意义,同时也成为计算机视觉及三维数据处理中的难题。

激光三角网格孔洞修补主要难点在于如何从孔洞区域获取更多信息,使修补点云与原始信息更加平滑融合。现有的激光点云孔洞修补方法一般分为两类^[6]:1) 直接利用孔洞周边邻域信息,如离散点云的孔洞修补。该方法首先构建点云的空间关系,通过边界检测算法提取孔洞边界,方法简单、运行速度较快,但对大数据点云数据修补效率较低^[7];2) 采用三角网格法对点云数据进行孔洞处理。当点云数据分布均匀时,孔洞曲面修补效果好。总体来说,三角网格法简单易行,不需要任何补充信息^[8]。该方法的好坏取决于网格的质量,对于曲率变化不大且数据量较小的点云数据具有较好的修补效果,但当曲率变化较大时,对网格的质量要求较高,修补难度大且耗时长。当点云数据量增大时,算法所用时间也会增多^[9]。

针对如何有效地进行孔洞区域的修补,许多学者从不同角度进行大量研究。针对大量复杂网格孔洞,张婧等^[10]引入全局凸优化能量模型,将提取孔洞边界问题转化为隐式曲面的演化过程,通过卷积和合成进行体素扩散完成孔洞修补,能够有效恢复复杂孔洞区域的显著特征。根据孔洞边界的点进行插值,并与 Delaunay 三角剖分法相结合是一种常用于医学领域的修补孔的方法^[11]。李月雯等^[12]利用原始网格模型建立泊松方程,对输入曲面进行拟合,同样适用于结构复杂的孔洞三维模型。泊松方程可以实现曲面重建技术与高质量网格的快速生成,且网格质量均匀^[13]。Sobhiyeh 等^[14]同样将孔洞修补问题简化为快速生成高质量网格,通过检测孔洞边界,利用边与角的关系生成新的、形状良好的面和顶

点来完成网格填充。张琦等^[15]对传统波前法进行改进,提出一种基于回溯双向波前法的孔洞修补方法,将三角化后的点云数据提取出孔洞边界,将该边界点集的回溯结果作为初始点集,利用正反向波前法新增点集直到修补完成,最终利用最小二乘平滑新增点集。该方法能够使修补区域与孔洞边界自然过渡。Wang 等^[16]提出一种修复三角网格孔洞的算法,通过求解调和方程将网格映射到参数空间,再对网格的顶点进行优化,以提高修补质量。王春香等^[17]针对大面积点云、跨面孔洞,提出一种基于遗传算法和反向传播(BP)神经网络的混合算法,利用遗传算法的全局化的优点,解决了 BP 神经网络容易陷入局部的缺点。Lin 等^[18]将孔洞分为非特征空洞和特征空洞,分别进行修补,对于包含尖锐特征的孔洞具有准确性和有效性。但是对模型中孔洞形状有一定限制性。耿国华等^[19]设计了一种基于二维网格的算法,结合边界顶点的曲率,边界轮廓线折角的余弦值以及相邻边界点的线段长度来预测最优匹配模型,最后使用二阶伞算子来平滑模型的修补边界,降低了修补误差。Dinesh 等^[20]采样孔边界的点,以边界为模板,寻找其他位置的最佳匹配区域,孔洞以迭代的形式进行修补。

由于径向基神经网络在非线形系统建模过程中对样本数据的过度依赖,基于径向基隐式曲面的三角网格孔洞修补方法^[21]对样本点云数据同样具有很强的依赖性,孔洞修补过程中容易陷入局部,导致修补结果表面不能自然过渡。为使点云孔洞修补不受模型自身特点限制,且能快速完成修补,本文提出了一种三角网格点云孔洞曲面修补算法,尤其对于孔洞较大且特征明显的模型也能高效修补。首先使用文献[22]方法检测孔洞边界,通过对孔洞三角化,可快速填充孔洞部分。然后利用最小二乘网络和建立孔洞区域的隐式曲面相融合,进一步优化网格大小和顶点位置,建立完整模型^[23]。最后在此基础上,通过求解三角网格上最小二阶导数,令曲面曲率变化最小,使得修补面曲率变化与周围趋势一致,从而修补网格无限逼近原始网格,最终孔洞修补部分与周围面自然连接,解决了孔洞修补过程中修补面难以融合整体的问题。实验结果分析表明,本文算法对于不同的三角网格孔洞数据,其修补误差相较于文献[21]、文献[24]和文献[25]的结果均有所降低。

2 方法总体框架

算法总体流程如图 1 所示。首先为精确定位孔

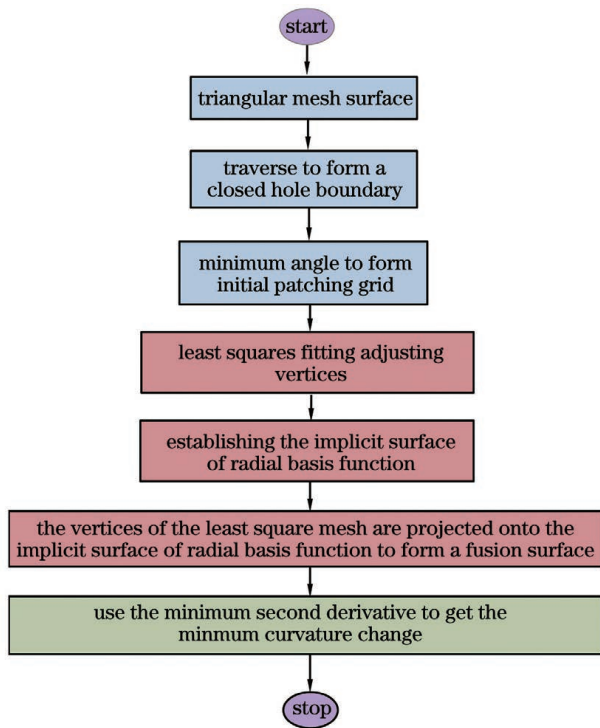


图 1 算法整体流程图

Fig. 1 Algorithm flow chart

洞修补位置,需要遍历三角片的每一条边,利用边界边与普通边的不同特点识别三角网格模型的孔洞边界。其次利用最小角度法生成三角片,填充孔洞部分,对孔洞进行初始修补。然后采用最小二乘网络对其进行拟合,得到规整网格。最后与

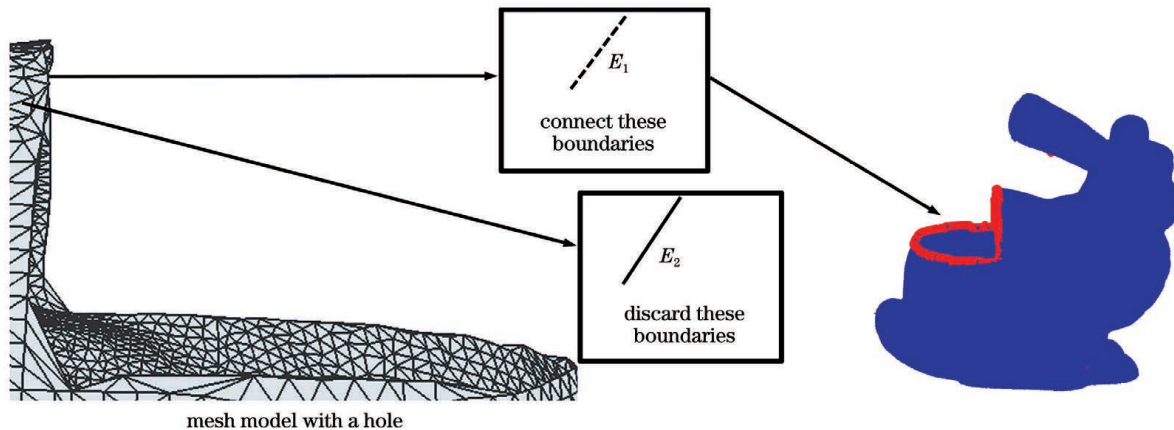


图 2 检测孔洞边界示意图

Fig. 2 Schematic diagram of inspection hole boundary

4 孔洞修补方法

4.1 孔洞初始修补

对于边界提取的孔洞,首先采用最小角度法^[22]根据孔洞内部夹角大小关系对孔洞区域进行初始修补,具体方法步骤如下:1)通过输入孔洞边界点信

径向基函数(RBF)隐式曲面进行融合,剔除不规则三角片。完成初始网格的优化。对曲面曲率变化较大和形状复杂的网格,采取在获得隐式曲面后,利用曲面最小二阶导数法,对修补面曲率变化规律进行优化,从而提高网格质量,最终实现孔洞修补。

3 孔洞边界检测

激光点云三角网格模型由一系列顶点及由这些顶点所构成的三角面片组成,三角面片的连接处定义为三角片的边。通常情况下,一条边连接两个三角面片,称为网格内部边,而如果某条边仅连接一个三角面片,则称为网格边界边。

孔洞边界提取在孔洞修补中占有重要地位,其准确性直接影响孔洞修补效果。为了能够准确定位待修补孔洞,采用文献[22]方法对孔洞进行边界提取,仅针对封闭网格模型进行研究,不考虑非封闭模型本身边界对于选择孔洞边界的影响。

孔洞边界检测示意图如图 2 所示,定义所有边界按顺序连接形成三角网格孔洞。根据边界边定义,可寻找到三角网格模型中所有的边界边。在具有孔洞的点云三角网格模型中,存在两种边界:1) E_2 同时连接两个三角片,即为内部边;2) E_1 只连接一个三角片,即为孔洞边界,将与此类似的边首尾相连即生成孔洞边界。

息,获取边界边长度及临边角度等,计算边界边长度的平均值 A_{aver1} ;2)根据步骤 1 中已获取信息,计算每个边界点的两相邻边夹角大小;3)寻找具有最小夹角的边界点,计算其两相邻边界点的距离 s ,判断 $s > 2 \times A_{aver1}$ 是否成立,若成立,则增加一个三角形[图 3(a)],反之则增加两个三角形[图 3(b)],并新

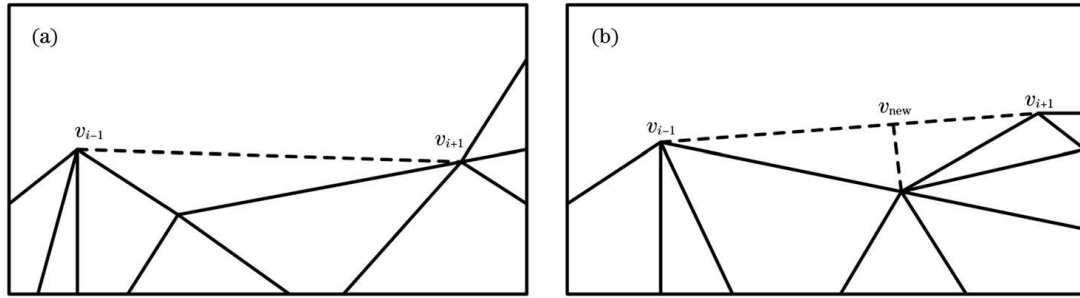


图 3 三角网格示意图。(a)添加一个三角形;(b)添加两个三角形

Fig. 3 Schematic diagrams of triangular grid. (a) Add a triangle; (b) add two triangles

增加一个边界点 v_{new} , 为边界点 v_{i-1} 和 v_{i+1} 的中点; 4) 更新边界点信息; 5) 判断孔洞是否修补完整, 若未完整转步骤 2, 则算法结束。

4.2 最小二乘网格

由于初始获得的修补网格在孔洞处比较独立, 与原始网格重合度不高, 且整个网格比较松散, 网格形状杂乱无序, 需对初始网格进行优化调整。采用最小二乘网格对网格顶点位置进行优化, 其优化条件为

$$v_i - \frac{1}{d_i} \sum_{j \in N_1(v_i)} v_j = 0, \quad (1)$$

式中: d_i 为顶点 v_i 的 1 环邻域顶点数。(1) 式可用一个线性方程组来描述: $\mathbf{L}\mathbf{V} = \mathbf{0}$, 其中 \mathbf{L} 是 Laplace 矩阵, \mathbf{V} 是网格边界顶点。具体形式为

$$\mathbf{L}_{ij} = \begin{cases} 1, & i = j \\ -\frac{1}{d_i}, & j \in N_1(v_i), \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (2)$$

式中: 矩阵 \mathbf{L} 的秩为 $n - k$; n 为网格顶点的数目; k 为网格连通区域个数; 如果网格全连通, 则矩阵 \mathbf{L} 的秩是 $n - 1$ 。若要使方程有解, 则需加入 $m (m \geq k)$ 个控制顶点坐标 \mathbf{v}_s 作为方程的边界条件, 在实际中将初始化网格边界顶点作为控制顶点。因此, 上述线性方程组求解等价于如下能量函数最小化求解,

$$\min \left\{ \|\mathbf{L}\mathbf{X}\| + \sum_{sec} |\mathbf{x}_s - \mathbf{v}_s|^2 \right\}, \quad (3)$$

式中: \mathbf{X} 表示 $n \times 3$ 的顶点坐标矩阵; \mathbf{x}_s 是对顶点 \mathbf{v}_s 进行一个偏移修正后的顶点。能量函数第一部分用于使网格顶点尽量光滑, 即每个顶点位于其 1 环邻域顶点中心, 第二部分用于控制顶点位置满足要求。最小二乘网格优势为能够生成高质量光滑网格, 生成过程仅需要网格拓扑连接关系和少数控制点坐标信息。此时的三角片大小形状相对一致, 但是没有保持孔洞模型的原始形状。因此需要利用 RBF 神

经网络的学习能力, 将孔洞边界的顶点作为训练数据, 运用到 RBF 神经网络中。这样沿着最小二乘网格顶点的方向就可以形成隐式曲面, 该隐式曲面可以保持孔洞原始模型的形状特征。

4.3 径向函数隐式曲面

RBF 为某种沿径向对称的标量函数, 如图 4 所示。定义空间中任一点 \mathbf{x} 到某一中心 \mathbf{x}_c 之间欧氏距离的单调函数, 记为 $h(\mathbf{x}, \mathbf{x}_c) = h(\|\mathbf{x} - \mathbf{x}_c\|)$, 当 \mathbf{x} 远离 \mathbf{x}_c 时, 函数取值很小。RBF 为三层 BP 网络, 可表示为多个基函数的线性组合,

$$f(\mathbf{x}) = \sum_{i=1}^n \lambda_i h(\|\mathbf{x} - \mathbf{x}_i\|). \quad (4)$$

其中, 常用的基函数形式为

1) Gaussian 函数 $\exp\{-\epsilon r\}^2$;

2) Polyharmonic spline 函数

$$h(r) = r_k, k = 1, 3, 5, \dots \text{ or } h(r) = r_k \ln(r), k = 2, 4, 6, \dots. \quad (5)$$

利用 RBF 通过给定控制点 \mathbf{x}_i 和对应值 f_i 之后, 求解网络系数 λ_i 。RBF 用于解决空间散乱数据点平滑插值问题, 函数零等值面即为所求曲面。

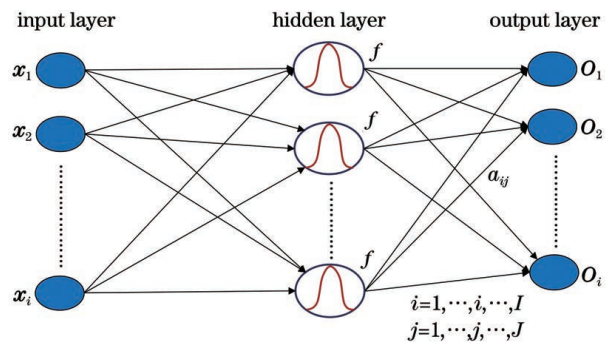


图 4 径向基函数神经网络

Fig. 4 Radial basis function neural network

在实际求解时函数 $f(\mathbf{x})$ 表达式中通常会增加一个一次多项式 $p(\mathbf{x})$,

$$f(\mathbf{x}) = \sum_{i=1}^n \lambda_i h(\|\mathbf{x} - \mathbf{x}_i\|) + p(\mathbf{x}), \quad (6)$$

$$p(x) = p_0 + p_1x + p_2y + p_3z. \quad (7)$$

将控制点位置 x_i 和值 f_i 代入函数 $f(x)$, 求解可确定隐式曲面 $f(x)$ 。控制点 x_i 可分为三类:

- 1) 边界控制点。曲面通过的点, 即 $f(x_i) = 0$ 。
- 2) 外部控制点。沿着法向正方向移动一小段距

离得到外部控制点, 取 $f(x_i) = -1$ 。

3) 内部控制点。与外部控制点相类似, 但移动方向为法向负方向, 取 $f(x_i) = 1$ 。选择基函数为 $h(r) = r^3$, 隐式曲面函数满足 $\Delta f = 0$, 将基函数代入后得到隐式曲面的表达式为

$$f(x) = \sum_{i=1}^n \lambda_i \left[\sqrt{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2 + (z - z_i)^2} \right]^3 + p_0 + p_1x + p_2y + p_3z. \quad (8)$$

在孔洞边界周围采集三角片顶点, 孔洞大小不一, 而缺失较为严重的孔洞修补利用神经网络学习, 对于训练样本的要求较高, 很难得到好的修补结果。针对该问题, 选取向外扩展的 3 层点云数据作为训练样本, 以充分学习孔洞边界的形状特征信息。在实际训练过程中, 点云的位置关系可以用 $z = f(x, y)$ 来表示。后续的训练就是基于该函数, 使得训练后的结果能符合该函数的映射关系。所以, 在训练中网络输入层神经元选取 x, y 作为节点, 输出层为 z , 对应为三角网格顶点坐标。然后将训练样本作为输入量输入该网络, 在误差允许的范围内, 最终新增的三角网格可以作为隐式网络的组成部分^[21, 26]。

4.4 最小化曲面曲率

由最小二乘网络产生的曲面, 沿着曲面拟合方向可形成隐式曲面。构造隐式曲面需利用孔洞周围三角片顶点法矢信息, 其直接决定曲面曲率变化。在孔洞修补中, 理想效果是填充部分能够与整体曲面平滑融合。面对曲率变化较大的孔洞, 隐式曲面往往不能完全地恢复孔洞原始形状特征, 修补结果不理想。如图 5 所示, 示意图横坐标 x 表示孔洞边界某点, $f(x)$ 为该顶点的高度。如图 5(a) 中 $x = 1$ 点和 $x = 2$ 点对应的高度, $f(2) = 5.0, f(1) = 2.0$ 。之前的修补效果如图 5(b) 所示, 以 $x = 1$ 点和 $x = 2$ 点为例, 经过最小角度、最小二乘拟合与神经网络的

学习, 孔洞部分新增点的高度会由于学习点的局限性, 只学习到附近点 $x = 2$ 的信息。这就导致孔洞修补面顶点高度与 $x = 2$ 相类似, 并没有得到 $x = 2$ 与 $x = 1$ 对应高度变化的信息, 如 $f_x(1) = f(2) - f(1) = 3.0, f_x(2) = f(3) - f(2) = 0.5$, 导数大小变化大, 即从 $x = 2$ 点到 $x = 3$ 点的变化不自然, 没有学习到曲面曲率的变化趋势, 故修补面没有体现原始孔洞的形状特征。

在已获得隐式曲面的基础上, 求解三角片上最小二阶导数, 使二阶导数在修补面所有点保持最小, 即曲面曲率变化最小, 与孔洞周围曲率变化趋势一致。改进修补区域曲面曲率 f_x , 使修补区域光滑地与原网格融合。 f_{xx} 为 f_x 的导数, 为使孔洞周围曲率平滑, 创建一个最小化二阶导数 f_{xx} 贴片, 来检测相隔点曲率变化, 为使二阶导数在补丁处的所有点都保持最小, 定义能量函数为

$$E(f) = \int_a^b (f_{xx})^2 dx. \quad (9)$$

若使 $E(f)$ 最小, 对于修补区域曲面的二阶导数需要保持很小。定义 $u(x)$ 在区间 $[a, b]$ 内满足一阶可导, 且 $u(a) = u(b) = 0$, 定义函数 $E[f(x) + u(x)\lambda]$, 其中 $u(x)$ 由标量 λ 控制, 假设 $f(x)$ 是 $E(x)$ 的最小化, 即当 $\lambda = 0$ 时, $E[f(x) + u(x)\lambda]$ 有最小值, 即 $\lambda = 0$ 时导数为 0。简化能量函数在标量 $\lambda = 0$ 处的导数值可得到

$$\int_a^b 2(f_{xx} + u_{xx}\lambda)u_{xx}dx, \quad (10)$$

式中: $f_{xx} = \Delta f$ 。为满足上式, 规定 $u(a) = u(b) = 0$, 在实际求解中得到 $f_{xx} = 0$, 即

$$\Delta \Delta f = \Delta^2 f = 0. \quad (11)$$

令 $\Delta^2 f = 0$, 创建平滑修补面, Δ^2 为拉普拉斯算子。上述条件存在于连续域, 而若整个修补网格离散, 则需对拉普拉斯算子进行离散化, 得到最终结果。如图 6 所示, 与图 5(b) 中的结果相比, 以 $x = 1, x = 2$ 两点为例, $f_x(1) = f(2) - f(1) = 3.0, f_x(2) = f(3) - f(2) = 1.3, x = 1$ 与 $x = 2$ 点的导数

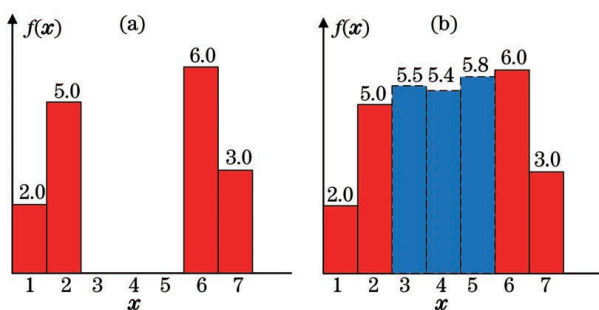


图 5 孔洞修补。(a) 孔洞示意图; (b) 孔洞修补示意图

Fig. 5 Hole repair. (a) Hole diagram; (b) hole repair diagram

变化相比未进行处理时有所降低,此时的曲率变化较小,即相邻点的三维信息能够遵循该区域的变化规律,从而说明该部分曲面变化更加自然。因此图 6 的结果相比图 5(b)更好。

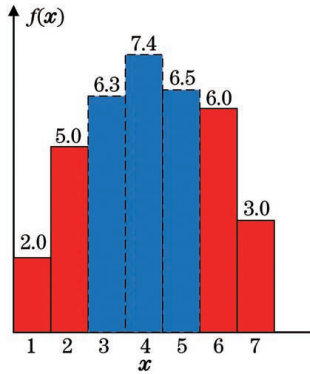


图 6 最终修补示意图

Fig. 6 Final repairing diagram

上述激光三角网格点云孔洞检测与曲面修补过程具体伪代码实现如下:

- 1) 输入点云数据;
- 2) 对数据进行 loop 细分寻找孔洞边界,计算每个边的索引值 $\{E_i, i=1, 2, \dots, N\} // N$ 为边的个数;
- 3) for $E_i=1$ do 将边 E_i 连接即为孔洞边界;
- 4) end for;
- 5) 计算边界边长度的平均值 A_{aver1} ;
- 6) 根据步骤 4 中已获取信息,计算每个边界点的两相邻边夹角大小;
- 7) 寻找具有最小夹角的边界点,计算其两相邻边界点的距离 s ;
- if $s > 2A_{aver1}$ do, 增加一个三角形; else if do 增加两个三角形;
- 8) for $i=1$ to N do 根据(1)~(3)式计算能量函数最小值;且满足最小二乘网格;
- 9) end for;
- 10) 将控制点 x_i 和值 f_i 代入函数 $f(x_i)$, 可确定隐式曲面 $f(x)$;
- 11) 将隐式曲面与最小二乘网格融合;
- 12) 求解融合曲面的最小曲率变化 f_{xx} ;
- 根据(9)~(11)式计算得到最小曲率变化值;调整顶点高度满足邻近点曲率变
- 13) 结束。

本文算法的创新之处在于对孔洞曲面曲率的优化。修补面形状特征与原始曲面形状特征的相似性决定了最终孔洞修补效果,其中曲面曲率是决定形

状特征的核心。对于一些简单的孔洞,如光滑曲面孔洞,只需要对其进行快速三角片修补,然后对三角片形状进行优化,利用最小二乘拟合和建立隐式曲面等算法即可生成高质量的网格。而对于曲率变化较大的孔洞,该算法并不适应。本文算法在此基础上,增加了对曲面曲率的优化,通过求解修补面上的最小二阶导数,使得二阶导数在修补面处的所有点保持最小,以及曲面曲率的变化最小,这将最大限度地遵循孔洞周围曲率的变化趋势,故最终的修补结果能够无限接近原始模型。

5 实验与分析

为验证本文算法有效性,以 Teapot、Rocker、Bunny 和球三角网格点云模型作为实验测试数据,人工在三角网格曲面上某自然面形成孔洞,分别代表四类常见的孔洞,即光滑曲面的孔洞、特征明显的孔洞、缺失曲面面积较大的孔洞和缺失区域体积较大的孔洞。硬件环境为 Intel(R) Core(TM) i5 2.6 GHz、内存 4 GB 的计算机。软件环境为 Visual studio2015 下,运行于 Windows 7 操作系统,编程语言为 C++。

通过计算四个模型不同复杂度孔洞修复后的平均曲率的均方根误差(R_{RMSE}),对比孔洞修补后点云模型与原始点云模型数据的真值之间的偏差。在实验中,观测次数 n 为有限值,真值用最可信赖值替代。原模型点云数据已知,而均方根误差为修补后曲面平均曲率($X_{obs,i}$)与原模型点云曲面平均曲率($X_{model,i}$)偏差的平方和实验次数 n 比值的平方根。表达式为

$$R_{RMSE} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_{obs,i} - X_{model,i})^2}{n}}, \quad (12)$$

式中: $X_{obs,i} = (k_1 + k_2)/2$; k_1 为通过曲面某点的极大曲率; k_2 为垂直于该极大曲率面的曲率。这里用文献[22]中的检测边界算法与三角化初始修补方法作为成熟的算法,与要解决的修补孔洞连接不自然的问题并不相关,只作为初始修补部分,故不进行实验比较。为进一步验证本文算法可靠性与优越性,传统 RBF 修补方法^[21]、文献[24]和文献[25]将作为对比算法。同时选择 Nguyen 等^[27-28]提出的 4 种对孔洞修补方法的评价标准:自动修补、修补速度快、适用范围广以及填充孔洞面片在密度和形状与其周围原有的面片是否接近,对以上四种算法进行评价与测试。

1) 实验 1

实验数据为 Stanford 3D Scanning Repository 的 Teapot 模型。该模型表面包括特征明显部分与

光滑曲面部分。为验证本文算法对光滑孔洞曲面的修补效果,该实验由人工在光滑区域挖去一部分。模型修补实验结果如图 7 所示。

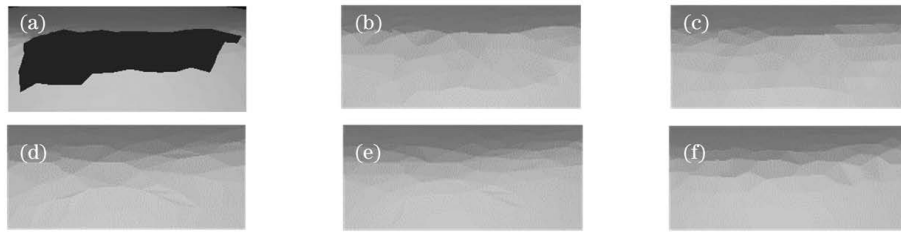


图 7 Teapot 模型孔洞修补结果。(a)网格孔洞细节图;(b)文献[21]算法;(c)文献[24]算法;(d)文献[25]算法;(e)本文算法;(f)原始模型

Fig. 7 Repair results of teapot model hole. (a) Mesh hole detail; (b) Ref. [21] algorithm; (c) Ref. [24] algorithm; (d) Ref. [25] algorithm; (e) proposed algorithm; (f) original model

由图 7(a)所示,该孔洞显示为形状无规则,位置处于整个模型的光滑连接曲面。图 7(b)~(e)为本文算法与文献[21]算法、文献[24]算法、文献[25]算法实验结果。由图 7 可知,虽然其他三种方法都能够修补孔洞区域,但是存在不符合边界特征的三角片,孔洞修补三角片过大导致与孔洞周围连接不自然,对应于模型所在区域的光滑特征未表现出来。而本文算法通过改变修补三角片的曲率,使得贴片的形状特征更能适应孔洞周围的轮廓,不仅修补了该区域,而且较好地融合了修补区域与原始模型的孔洞边界,保持了该区域的光滑特征。

表 1 是 Teapot 孔洞模型修补的实验数据。可知,本文算法修补过程中新增的点云个数分别为文献[21]算法、文献[24]算法、文献[25]算法的 33.9、

12.7、3.2 倍;而新增三角片数量分别为其他三种算法的 29.8、12.1、2.7 倍。新增的顶点相对其他方法更多,这虽然导致算法在时间上有所增加,但由于改变了相邻点导数的变化程度,导数变化程度减小,更加细化了孔洞区域,对于模型的细节部分进行优化。同时,对于该模型,本文算法的 RMSE 相比于[21]算法、文献[24]算法、文献[25]算法分别降低了 80.31%、59.62%、68.50%。这表明修补区域的平均曲率与原始模型的平均曲率更加接近,即修补后的模型更接近真实模型。图 8 为修补后的模型的平均曲率分布图像。在曲率变化较大的区域,曲面颜色较深。结果表明,本文算法在孔洞区域的颜色显示与周围区域保持一致,相对其他算法噪点较少,充分说明了本文算法的有效性。

表 1 Teapot 模型孔洞修补数据

Table 1 Repair data of teapot model hole

Algorithm	Number of new vertices	Number of new triangles	Time /s	R_{RMSE} /mm
Ref. [21] algorithm	1045	2431	0.760	0.452
Ref. [24] algorithm	2783	5957	1.458	0.292
Ref. [25] algorithm	10920	26530	1.190	0.379
Proposed algorithm	35465	72370	1.348	0.089

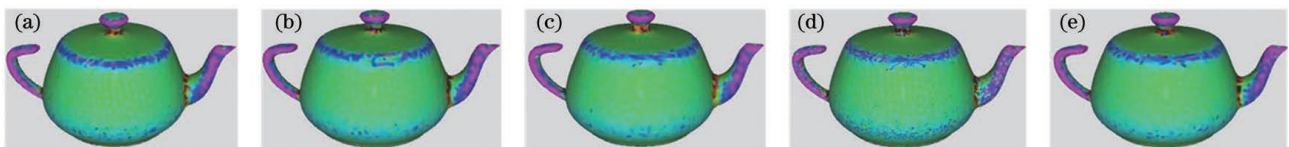


图 8 平均曲率分布图像。(a)文献[21]算法;(b)文献[24]算法;(c)文献[25]算法;(d)本文算法;(e)原始模型

Fig. 8 Mean curvature distribution images. (a) Ref. [21] algorithm; (b) Ref. [24] algorithm; (c) Ref. [25] algorithm; (d) proposed algorithm; (e) original model

2) 实验 2

该实验选取 Rocker 模型,为一机器部件。为验

证本文算法对于特征明显及曲率变化较大孔洞的修补效果,在零件的转动轴处挖去一部分,修补效果对

比如图 9 所示。

图 9 为 Rocker 模型修补效果,与文献[21]、文献[24]和文献[25]的修补结果相比,本文算法不但保持了整体模型的形状特征,而且对复杂区域能做到保持原模型的局部特征。文献[21]和[24]方法修补后的效果没有体现原模型该处的形状,

修补后仍存在缺失区域。文献[25]方法与本文方法都能够将修补区域与原模型孔洞边界进行融合,但本文方法较文献[25]算法更加细化了该区域,使得两者更加自然地融合在一起。本文算法解决了修补特征明显孔洞过程中丢失特征值的问题。

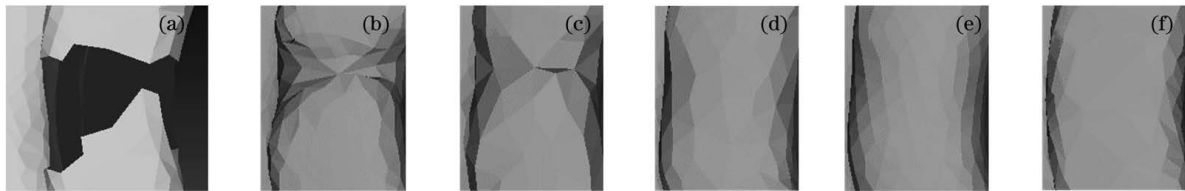


图 9 Rocker 模型孔洞修补结果。(a)网格孔洞细节图;(b)文献[21]算法;(c)文献[24]算法;(d)文献[25]算法;(e)本文算法;(f)原始模型

Fig. 9 Repair results of rocker model hole. (a) Mesh hole detail; (b) Ref. [21] algorithm; (c) Ref. [24] algorithm; (d) Ref. [25] algorithm; (e) proposed algorithm; (f) original model

表 2 为修补 Rocker 孔洞模型的实验数据,孔洞两侧的曲面是修复重点。从实验结果可以看出,文献[21]算法、文献[24]算法和文献[25]算法虽然具有较快的速度,但是新增顶点和三角片相对本文算法较少,这导致修补后仍缺失较大区域。本文算法通过减小曲率变化产生更多的顶点和三角片来优化曲面,能够修补曲率变化大的侧面,从误差结果也可以看出,本文算法的 RMSE 比文

献[21]算法、文献[24]算法、文献[25]算法分别降低了 69.52%、51.41%、46.58%。修补后模型的平均曲率的分布如图 10 所示,孔洞区域为特征明显部分,修补后的结果若分布图颜色较深,则表明该部分修补结果仍存在缺失部分,没有恢复孔洞原始特征。而本文算法得到的结果在此区域较浅,表明该算法针对曲率较大孔洞的修补结果良好。

表 2 Rocker 模型孔洞修补数据

Table 2 Repair data of rocker model hole

Algorithm	Number of new vertices	Number of new triangles	Time /s	R_{RMSE} /mm
Ref. [21] algorithm	474	1001	0.611	0.639
Ref. [24] algorithm	424	933	1.359	0.531
Ref. [25] algorithm	3240	7682	1.402	0.482
Proposed algorithm	8974	18001	2.371	0.258

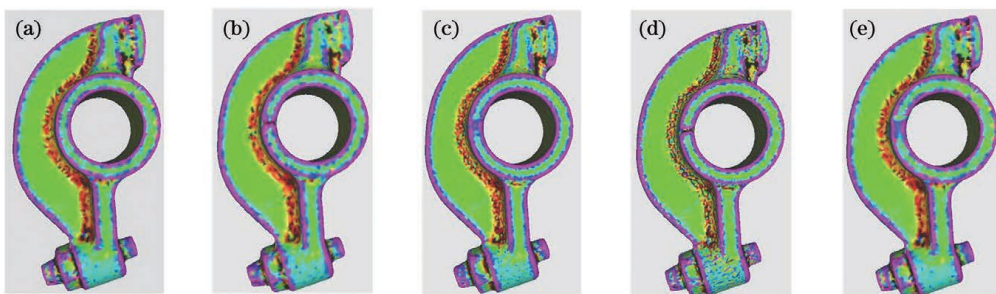


图 10 平均曲率分布图。(a)文献[21]算法;(b)文献[24]算法;(c)文献[25]算法;(d)本文算法;(e)原始模型

Fig. 10 Mean curvature distribution images. (a) Ref. [21] algorithm; (b) Ref. [24] algorithm; (c) Ref. [25] algorithm; (d) proposed algorithm; (e) original model

3) 实验 3

针对模型表面缺失区域较大的情况,本组实验选取 Stanford 3D Scanning Repository 的 Bunny 模

型。如图 11(a)所示,该模型的孔洞较大,需要修补的细节更多。图 11 为各个算法的修补效果对比,表 3 为本组实验数据。

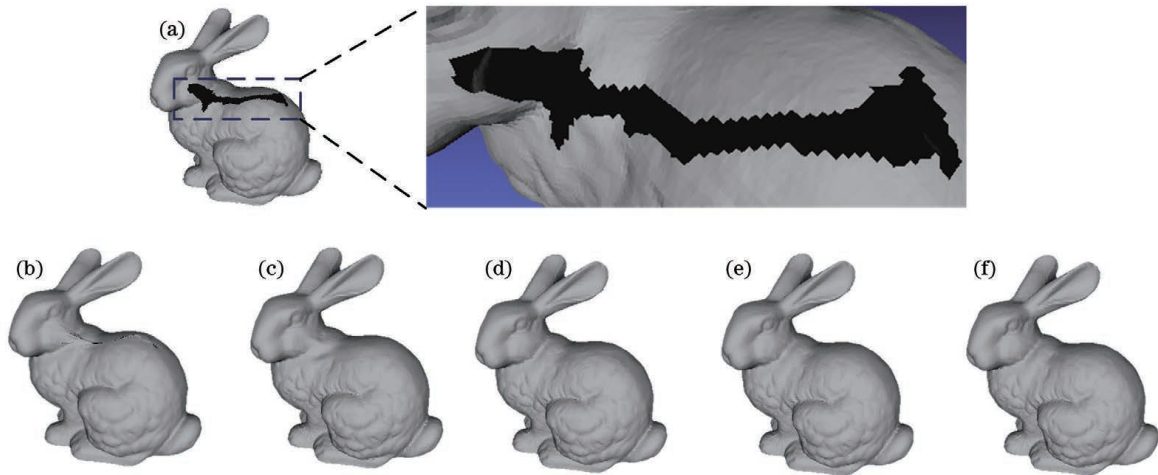


图 11 Bunny 模型孔洞修补结果。(a)网格孔洞细节图;(b)文献[21]算法;(c)文献[24]算法;(d)文献[25]算法;(e)本文算法;(f)原始模型

Fig. 11 Repair results of bunny model hole. (a) Mesh hole detail; (b) Ref. [21] algorithm; (c) Ref. [24] algorithm; (d) Ref. [25] algorithm; (e) proposed algorithm; (f) original model

表 3 Bunny 模型孔洞修补数据

Table 3 Repair data of bunny model hole

Algorithm	Number of new vertices	Number of new triangles	Time /s	$R_{\text{RMSE}} / \text{mm}$
Ref. [21] algorithm	3259	6399	69.328	9.382×10^{-3}
Ref. [24] algorithm	4921	8217	45.000	3.019×10^{-5}
Ref. [25] algorithm	2788	5955	16.000	4.611×10^{-5}
Proposed algorithm	5201	9483	17.180	9.932×10^{-6}

图 11(a)为 Bunny 模型孔洞,该孔洞模型孔洞面积更大,且对于该模型来说,连接的部位较多,涉及表面曲率变化较大的区域,如头与身体连接部位。修补后保留原区域特征难度增大。文献[21]算法在修补曲率变化较大部位时,存在修补面凸起的情况,并没有恢复该区域的特征,且修补后的贴片与原模型的孔洞边界没有很好地融合。Bunny 模型的部分缺失区域为光滑曲面,文献[24]算法和文献[25]算法及三角网格点云孔洞曲面修补的方法都能够保持这一形状特征。从表 3 可以得出,针对该类模型,

虽然时间并没有大幅度缩短,但相对其他三种算法误差更小。并且 RMSE 较其他两种方法分别降低了 67.1% 和 78.46%,大大降低了与原始模型的误差。

由图 12 的平均曲率分布图可知,Bunny 模型在孔洞区域的特征表示为更深的颜色,非特征区域表示为浅色。在孔洞修补过程中,相比较其他三种方法的结果,本文算法恢复了该区域的特征,说明修补部分更加接近原始模型该区域的曲率变化,也充分说明了算法的有效性。

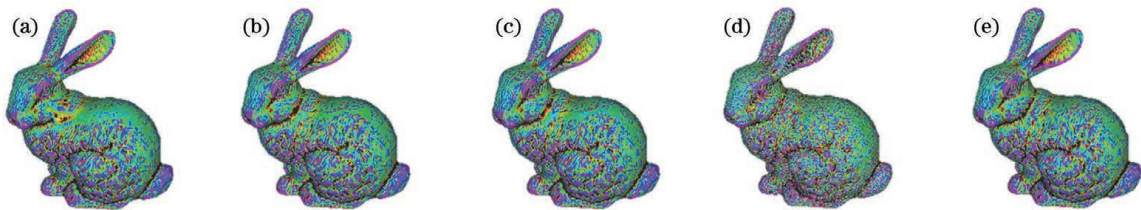


图 12 平均曲率分布图。(a)文献[21]算法;(b)文献[24]算法;(c)文献[25]算法;(d)本文算法;(e)原始模型

Fig. 12 Mean curvature distribution images. (a) Ref. [21] algorithm; (b) Ref. [24] algorithm; (c) Ref. [25] algorithm; (d) proposed algorithm; (e) original model

4) 实验 4

针对模型空间缺失区域较大的情况,该实验选取一球模型,缺失部分如图 13(a)所示。该模型修

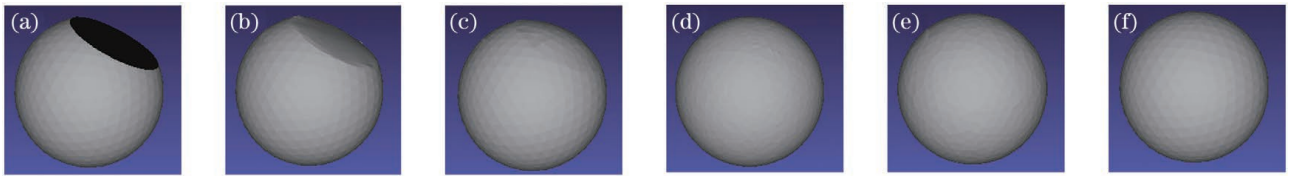


图 13 球模型孔洞修补结果。(a)网格孔洞细节图;(b)文献[21]算法;(c)文献[24]算法;(d)文献[25]算法;(e)本文算法;(f)原始模型

Fig. 13 Repair results of ball model hole. (a) Mesh hole detail; (b) Ref. [21] algorithm; (c) Ref. [24] algorithm; (d) Ref. [25] algorithm; (e) proposed algorithm; (f) original model

表 4 球模型孔洞修补数据

Table 4 Repair data of ball model hole

Algorithm	Number of new vertices	Number of new triangles	Time /s	R_{RMSE} /mm
Ref. [21] algorithm	354	1363	2.815	0.318
Ref. [24] algorithm	81	162	2.163	0.082
Ref. [25] algorithm	52	125	0.047	0.049
Proposed algorithm	218	418	0.928	0.012

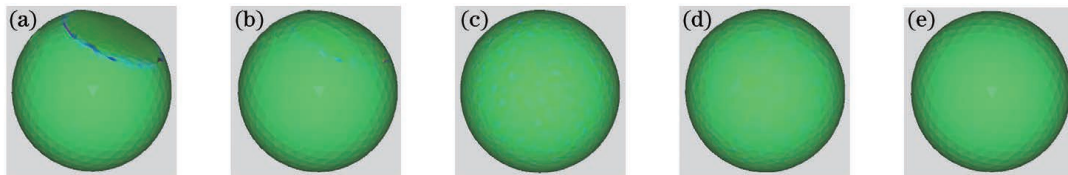


图 14 平均曲率分布图。(a)文献[21]算法;(b)文献[24]算法;(c)文献[25]算法;(d)本文算法;(e)原始模型

Fig. 14 Mean curvature distribution images. (a) Ref. [21] algorithm; (b) Ref. [24] algorithm; (c) Ref. [25] algorithm; (d) proposed algorithm; (e) original model

图 13 分别为本文方法与文献[21]、文献[24]和文献[25]的修补结果对比。相比于其他孔洞,该模型空间缺失部分较大,修补难度较高。从对比图中可以看出,通过文献[21]和文献[24]方法得到的结果并没有恢复出该模型的“球”特征,且在平均曲率分布图中,其修补边界颜色较深,孔洞边界存在明显修补痕迹。本文算法和文献[24]方法都能恢复该模型原始特征,而该方法得到的球网格模型的网格大小更加接近原始模型,在恢复“圆”特征的同时,也保留了网格特征,虽然时间比文献[24]方法时间消耗多,但 RMSE 相比降低了 75.51%,表明最终的结果更加接近于原始模型。实验结果表明,该方法对于空间孔洞缺失的情况有很好的效果。

通过四组测试数据的结果可以表明,点云孔洞修补的关键在于高质量的网格顶点和修补面曲率的调整。高质量的网格是后续修补的基础,通过最小二乘拟合和建立隐式曲面可以得到相对规范化的网

格顶点。文献[21]算法利用径向神经网络得到的隐式曲面能够使得修补网格更加规范,比较适用于光滑曲面,不适用于缺失特征信息较多的孔洞模型。文献[25]算法同样利用了最小角度法进行孔洞初始修补,这保证了整个修补过程的高效性。在得到初始修补网格后,同样对顶点进行了调整。文献[24]算法仅仅考虑了单连通区域的孔洞模型,对于一些具有复杂拓扑结构的孔洞难以达到预期的修补效果,在此基础上对曲率进行调整,使其适用于各种复杂的孔洞类型,且能够解决修补面与孔洞边界连接不自然的问题。

6 结 论

本文针对激光三角网格点云孔洞曲面修补提出了在隐式曲面修补孔洞的基础上对修补网格的曲率进行调整的方法。通过对孔洞区域新增三角片曲率的无限逼近,反映出原网格的形状变化,完成修补。

通过对几个不同种类不同形状网格模型的修补,解决了曲面曲率变化大的孔洞模型难以修复的问题。通过与几种修补孔洞算法的对比,该算法将曲率最小化从而实现了快速且光滑的修补复杂网格,因此反映出原始网格的形态,使修补区域与原始网格的融合更加自然,证明了该算法的有效性。同时该算法可适用于各种形态孔洞模型,对于光滑曲面模型效果更佳。针对实际情况中出现的多孔洞形式,该算法略显不足,为下一步的研究重点。

参 考 文 献

- [1] Cao G P, Liu X S, Liu N, et al. Segmentation of subway tunnel wall surface objects based on laser 3D point cloud[J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(21): 2110001.
曹桂萍, 刘行思, 刘念, 等. 基于激光三维点云分割地铁隧道壁表面物体[J]. *光学学报*, 2020, 40(21): 2110001.
- [2] Wang G, Liu S T, Chen C, et al. Boundary extraction of building facade based on laser point clouds[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2019, 56(18): 181002.
王果, 刘绍堂, 陈超, 等. 基于激光点云的建筑物立面轮廓提取[J]. *激光与光电子学进展*, 2019, 56(18): 181002.
- [3] Pang Z Y, Zhou Z F, Wang L D, et al. Improved three-dimensional reconstruction algorithm for point cloud data[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2020, 57(2): 021102.
庞正雅, 周志峰, 王立端, 等. 改进的点云数据三维重建算法[J]. *激光与光电子学进展*, 2020, 57(2): 021102.
- [4] Zhang Z J, Cheng X J, Cao Y J, et al. Application of 3D reconstruction of relic sites combined with laser and vision point cloud[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2020, 47(11): 1110001.
张子健, 程效军, 曹宇杰, 等. 结合激光与视觉点云的古遗迹三维重建应用[J]. *中国激光*, 2020, 47(11): 1110001.
- [5] Zhang J, Yue W N, Wang N, et al. Anisotropic hole filling algorithm for triangle mesh models[J]. *Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics*, 2007, 19(7): 892-897.
张洁, 岳玮宁, 王楠, 等. 三角网格模型的各向异性孔洞修补算法[J]. *计算机辅助设计与图形学学报*, 2007, 19(7): 892-897.
- [6] Yang Y Q, Li S H. Hole repairing algorithm for point cloud data based on least square support vector machine[J]. *Journal of Jilin University (Science Edition)*, 2018, 56(3): 692-696.
杨永强, 李淑红. 最小二乘支持向量机的点云数据孔洞修补算法[J]. *吉林大学学报(理学版)*, 2018, 56(3): 692-696.
- [7] Wang C X, Zhang Y, Liang L, et al. Application of the extreme learning machine algorithm repair the hole of the scattered point cloud[J]. *Modern Manufacturing Engineering*, 2018(11): 44-49.
王春香, 张勇, 梁亮, 等. 极限学习机在散乱点云孔洞修补中的应用[J]. *现代制造工程*, 2018(11): 44-49.
- [8] Li S, Ma C C, Lu F, et al. Island hole repairing based on multi-directional advancing method [J]. *China Mechanical Engineering*, 2019, 30(20): 2473-2479.
李松, 马聪聪, 陆帆, 等. 基于多向波前法的岛屿孔洞修补[J]. *中国机械工程*, 2019, 30(20): 2473-2479.
- [9] Qian B Z, Lan Q P. Repairing tunnel 3D point cloud hole [J]. *Engineering of Surveying and Mapping*, 2017, 26(3): 46-50, 55.
钱伯至, 蓝秋萍. 隧道三维点云孔洞修复方法[J]. *测绘工程*, 2017, 26(3): 46-50, 55.
- [10] Zhang J, Zhou M Q, Geng G H. Repair methods for complex hole of three-dimensional model based on variational level set method[J]. *Application Research of Computers*, 2018, 35(4): 1254-1257.
张婧, 周明全, 耿国华. 基于变分水平集的三维模型复杂孔洞修复[J]. *计算机应用研究*, 2018, 35(4): 1254-1257.
- [11] Nie E J, Li J, Zhang R M, et al. Three dimensional point cloud hole repairing strategy for binocular stereo reconstruction [C] // 2017 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO), December 5-8, 2017, Macao, China. New York: IEEE Press, 2017: 2456-2461.
- [12] Li Y W, Geng G H, Wei X R. Hole-filling algorithm based on Poisson equation[J]. *Computer Engineering*, 2017, 43(10): 209-215, 221.
李月雯, 耿国华, 魏潇然. 基于泊松方程的孔洞修补算法[J]. *计算机工程*, 2017, 43(10): 209-215, 221.
- [13] Centin M, Pezzotti N, Signoroni A. Poisson-driven seamless completion of triangular meshes [J]. *Computer Aided Geometric Design*, 2015, 35/36: 42-55.
- [14] Sobhiyeh S, Dechenaud M, Dunkel A, et al. Hole filling in 3D scans for digital anthropometric applications [C] // 2019 41st Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society (EMBC), July 23-27, 2019, Berlin, Germany. New York: IEEE Press, 2019: 2752-

- 2757.
- [15] Zhang Q, Lin S Z, Bai J L, et al. Hole repairing in point cloud based on backtracking bidirectional advancing front method [J]. *Journal of Test and Measurement Technology*, 2017, 31(6): 512-518.
张琦, 蔺素珍, 白佳璐, 等. 基于回溯双向波前法虚拟修补点云孔洞 [J]. *测试技术学报*, 2017, 31(6): 512-518.
- [16] Wang X C, Hu J P, Zhang D B, et al. Multi-scale geometry detail recovery on surfaces via empirical mode decomposition [J]. *Computers & Graphics*, 2018, 70: 118-127.
- [17] Wang C X, Zhang Y, Liang L, et al. Three dimensional point cloud hole repair studies based on the GA-BP neural network [J]. *Manufacturing Technology & Machine Tool*, 2018(3): 76-79.
王春香, 张勇, 梁亮, 等. 基于 GA-BP 神经网络的三维点云孔洞修补研究 [J]. *制造技术与机床*, 2018(3): 76-79.
- [18] Lin H B, Chen J Y, Zhang Y R, et al. Feature preserving filling of holes on point sampled surfaces based on tensor voting [J]. *Mathematical Problems in Engineering*, 2018, 2018: 1-12.
- [19] Geng G H, Yu F, Yang W, et al. Three-dimensional model restoration with shape-constrained sample filling [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2018, 26(11): 2863-2872.
耿国华, 余凡, 杨稳, 等. 形状约束的样本填充式三维模型修复 [J]. *光学精密工程*, 2018, 26(11): 2863-2872.
- [20] Dinesh C, Bajić I V, Cheung G. Exemplar-based framework for 3D point cloud hole filling [C] // 2017 IEEE Visual Communications and Image Processing (VCIP), December 10-13, 2017, St. Petersburg, FL, USA. New York: IEEE Press, 2017: 1-4.
- [21] Wang H T, Zhang L Y, Li Z W, et al. Repairing holes in triangular meshes based on radial basis function neural network [J]. *China Mechanical Engineering*, 2005, 16(23): 2072-2075, 2079.
王宏涛, 张丽艳, 李忠文, 等. 基于 RBF 神经网络的三角网格曲面孔洞修补 [J]. *中国机械工程*, 2005, 16(23): 2072-2075, 2079.
- [22] Zhang L Y, Zhou R R, Zhou L S. Research on the algorithm of hole repairing in mesh surfaces [J]. *Journal of Applied Sciences*, 2002, 20(3): 221-224.
张丽艳, 周儒荣, 周来水. 三角网格模型孔洞修补算法研究 [J]. *应用科学学报*, 2002, 20(3): 221-224.
- [23] Zhou M D, Lin J C, Jin X G. Model repair with least-squares meshes [J]. *Journal of Engineering Graphics*, 2009, 30(5): 13-21.
周明东, 林俊聪, 金小刚. 最小二乘网格的模型修补 [J]. *工程图学学报*, 2009, 30(5): 13-21.
- [24] Liu Z, Wang Y B, Bai L L, et al. Detail-preserving hole-filling for complex 3D models [J]. *Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics*, 2016, 28(12): 2052-2059.
刘震, 王艳宾, 白丽丽, 等. 曲面细节特征保持的三维模型孔洞修复方法 [J]. *计算机辅助设计与图形学学报*, 2016, 28(12): 2052-2059.
- [25] Liu S F, Liang J, Dong B. Rapid mesh hole filling in body model [J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2018, 52(8): 37-42.
刘世凡, 梁晋, 董波. 人体模型网格孔洞的快速修复方法 [J]. *西安交通大学学报*, 2018, 52(8): 37-42.
- [26] Xiong B S, Yu Z R, Wang Q. 3D incomplete points repairing based on RBF neural network [J]. *Computer Engineering and Applications*, 2006, 42(16): 50-52.
熊邦书, 俞子荣, 王琪. 基于 RBF 神经网络的三维残缺数据修补算法 [J]. *计算机工程与应用*, 2006, 42(16): 50-52.
- [27] van Sinh N, Ha T M, Thanh N T. Filling holes on the surface of 3D point clouds based on tangent plane of hole boundary points [C] // Proceedings of the Seventh Symposium on Information and Communication Technology, December 8, 2016, Ho Chi Minh City Vietnam. New York: ACM, 2016: 331-338.
- [28] Nguyen V S, Trinh T H, Tran M H. Hole boundary detection of a surface of 3D point clouds [C] // 2015 International Conference on Advanced Computing and Applications (ACOMP), November 23-25, 2015, Ho Chi Minh City, Vietnam. New York: IEEE Press, 2015: 124-129.