面向地下不规则巷道的点云孔洞修复方法

杨立克[1]，王晓杰[2,*]，付刚毅[1]
1. 嵩县山金矿业有限公司运营管理部，河南 洛阳，471400
2. 山东科技大学，测绘与空间信息学院，山东 青岛，266590

摘要： 针对地下不规则巷道点云孔洞边界难以检测、复杂曲面修复效果不佳的问题，提出一种基于自适应密度约束与多谐波径向基函数曲面插值的孔洞修复方法。采用密度与几何角度双层过滤检测边界，经聚类、局部投影与凹包提取构建闭合轮廓，结合人机交互修正断裂边界；利用 RBF 隐式曲面插值与填充点投影恢复孔洞区域。实验结果表明，五个模拟孔洞的平均倒角距离为 2.12mm、豪斯多夫距离为 5.77mm、法向偏差为 4.42°、点数偏差率为 4.3%。实际巷道修复结果验证了方法的工程可行性。

关键词： 地下巷道；不规则点云；孔洞修复；自适应密度约束；径向基函数

A Point Cloud Hole-Filling Method for Irregular Underground Tunnels

Like Yang[1], Xiaojie Wang[2,*], Gangyi Fu[1]
1. Operation and Management Department of Shanjin Mining Co., Ltd. in Songxian County, Luoyang, Henan, 471400, China
2. College of Geodesy and Geomatics, Shandong University of Science and Technology, QingDao, Shandong, 266590, China

Abstract: To address the challenges of hole boundary detection and complex surface reconstruction in irregular underground roadway point clouds, a hole-filling method based on adaptive density constraints and polyharmonic RBF interpolation is proposed. Hole boundaries are detected through density–angle filtering and refined using clustering, local projection, concave hull extraction, and interactive correction. Missing surfaces are reconstructed through RBF implicit interpolation and point projection. Experiments on five simulated holes achieve average Chamfer and Hausdorff distances of 2.12 mm and 5.77 mm, respectively, a normal deviation of 4.42°, and a point count deviation rate of 4.3%. Real-world roadway experiments further demonstrate the method's practical feasibility.

Keywords: Underground Tunnels; Irregular Point Clouds; Hole Filling; Adaptive Density Constraints; Radial Basis Functions

三维激光扫描技术凭借高精度、高密度、操作便捷等优势，已成为矿井、隧道等地下空间数据获取的重要技术手段。受目标表面高反光特性、测量视线遮挡以及设备抖动等因素影响，点云局部区域易出现数据缺失现象，即形成孔洞[1]。此类孔洞将严重干扰局部空间几何信息的准确提取，因此有必要对缺失的点云数据进行修复。

现有孔洞修复方法主要采用三角化、泊松曲面重建及径向基函数插值等技术。崔文等[2]将最小角度准则与最小二乘网格、径向基函数隐式曲面相融合，完成孔洞修复。Dinesh 等[3]采用孔洞附近相似区域自适应填补孔洞。Van 等[4]将三维点云投影至二维平面，通过三角化实现孔洞修复。陈飞舟等

[5]通过径向基函数插值曲面拟合缺失区域点云数据，实现点云补全。

近年来，Fortes 等[6]将体积约束与张力径向基函数（Radial Basis Function，RBF）结合，实现三维数据拟合与孔洞填补。Zhang 等[7]利用密度和二维投影识别孔洞边界，融合几何与曲率信息进行模糊推理修复；随后结合二维与三维数据提出螺旋分层填补方法[8]。Xie 等[9]将地形点云分解为高、低频分量，通过 B 样条曲面拟合与图像修复填补不规则孔洞。

针对多孔洞、曲率变化复杂及点云密度不均匀条件下的边界检测与修复问题，本文提出基于自适应密度约束的边界检测方法，并采用 RBF 曲面插值修复巷道中常见的孔洞类型。通过模拟孔洞真值对比及实际巷道数据验证方法的有效性。

1 点云孔洞修复方法

以提取后的巷道壁点云为输入，首先检测孔洞边界并构建闭合轮廓，随后选取边界及邻域约束点建立 RBF 隐式曲面，将初步填充点投影至曲面上，实现与原始巷道几何特征自然融合的修复。孔洞修复流程如图 1 所示。

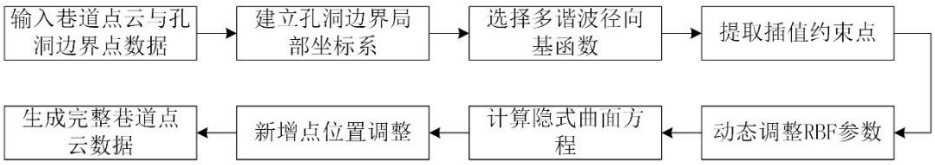

图 1 点云孔洞修复流程

Fig. 1 Point Cloud Hole Repair Workflow

1.1 自适应边界检测与轮廓闭合

传统边界检测方法常使用固定阈值，难以适应点云密度不均匀的场景。本文通过随机采样估算全局平均密度，依据搜索半径内的邻域点数动态设置密度阈值，并设置最小阈值以防止过度过滤：

$$T_\alpha = max(\alpha \cdot \bar{\rho}, T_{\min}) \tag{1}$$

式中，α为密度比例系数，$T_{\min}$为预设的最小阈值。

建立 kd-tree 空间索引，并将邻域点投影至最小二乘拟合的局部切平面。对邻域方向向量归一化并按极角排序，计算相邻向量的夹角，取最大角度缺口。对于通过密度过滤的候选点，按下式判定边界点：

$$\begin{cases} \Delta\theta_{max} > T_\theta & 判定为边界点 \\ \Delta\theta_{max} \le T_\theta & 判定为非边界点 \end{cases} \tag{2}$$

式中，最大角度缺口反映中心点周围邻域分布的完整程度，角度阈值用于区分边界点与内部点。密度过滤先剔除稀疏噪声，几何角度判别进一步定位孔洞边界。

采用欧氏聚类将边界点划分为独立簇，通过 PCA 将三维点集投影至局部平面，提取凹包轮廓，再将轮廓映射回原始三维点云。对于巷道分段造成的断裂边界，结合人机交互合并边界片段，并重新提取凹包，生成统一的闭合边界多边形，为孔洞修复提供几何约束。

1.2 RBF 隐式曲面插值与填充点投影

选取孔洞边界点及其 k 近邻点作为插值约束点。对于分割后的特征孔洞，使用其非特征部分的边界点及邻域点。采用径向基函数构建连续的隐式曲面：

$$f(r) = \sum_{i=1}^{n} w_i \, \phi(\|r - q_i\|) + p(r) \tag{3}$$

式中，r为空间任意点，q为约束点，w为权重系数，$p(r)$为线性多项式项。选用三次径向基核函数$\varphi(r)=|r|^3$，并依据插值条件及正交条件求解权重与多项式系数。为避免零解，在曲面外沿一致法向移动固定距离，建立附加约束点；曲面上插值约束值设为 0，附加约束值设为 0.01。

将初步生成的孔洞填充点调整至隐式曲面上，更新公式及步长计算式为：

$$R = R_0 - \gamma \cdot \nabla F(R_0) \tag{4}$$

$$\gamma = \frac{F(R_0)}{\|\nabla F(R_0)\|^2} \tag{5}$$

式中，R_0为待调整点当前位置，$\nabla F(R_0)$为隐式曲面的梯度，γ为迭代步长。通过沿梯度反方向移动，将填充点投影至隐式曲面，使修复面与原始巷道曲面保持连续。

2 实验验证与分析

2.1 实验数据与评价指标

实验数据来自河南省某金属矿山，采用欧思徕 R8+手持式激光扫描仪获取，原始点云约 4 亿点，巷道包含直巷道、弧段巷道及多种分叉结构。选取区域 3、4、5、7、12 的巷道壁点云开展孔洞检测与修复实验，覆盖弯曲、倾斜、表面突变等不规则几何特征。

为获得可靠的真值参照，在结构完整、密度均匀的巷道壁区域裁剪五个不同形状与面积的模拟孔洞，如图 2 所示。孔洞 a 模拟电箱遮挡，b 模拟管道遮挡，c 模拟电缆遮挡，d、e 模拟表面自然起伏。保留被裁剪的原始点云作为真值，用于评价边界检测数量与修复几何精度。

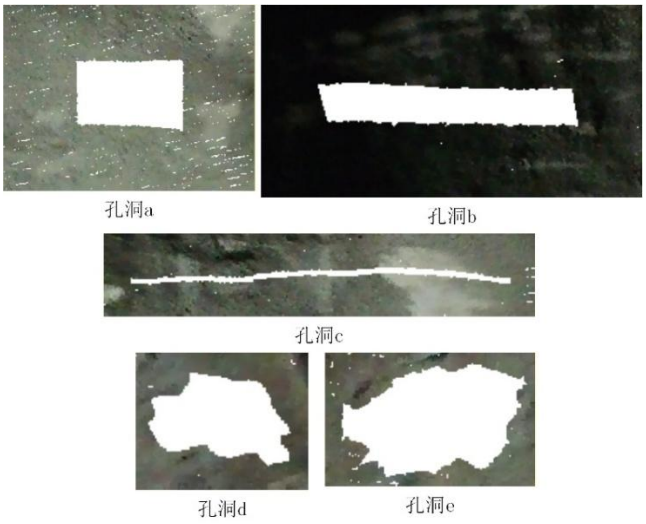

图 2 五个模拟孔洞

Fig. 2 Five Simulated Holes

边界检测采用输出边界点数与真值边界点数的比值评价捕获完整程度。孔洞修复选取泊松曲面重建法和三角化方法作为对比，采用倒角距离（CD）[10]、豪斯多夫距离（HD）、平均法向偏差（MND）和点数偏差率（PCD），分别评价几何贴合程度、局部方向连续性及填补密度一致性。

2.2 孔洞边界检测结果

表 1 给出了五个模拟孔洞的边界点检测结果。改进后各孔洞的边界点数量比值均超过 98%，均值为 98.94%，较传统方法有明显提升，表明自适应密度与几何角度约束能够改善不规则轮廓的边界提取，为后续修复提供可靠的约束条件。

表 1 模拟孔洞边界点检测结果

Table 1 Detection Results of Simulated Hole Boundary Points

孔洞区域	真值边界点数	改进前检测点数	改进后检测点数	改进前召回率(%)	改进后召回率(%)
孔洞 a	407	367	405	90.17	99.50
孔洞 b	738	657	731	89.02	99.05
孔洞 c	931	839	925	90.12	99.36
孔洞 d	304	257	299	84.54	98.36
孔洞 e	377	306	371	81.17	98.41

2.3 孔洞修复结果与精度对比

不同插值方法的修复结果如图 3 所示。线性插值生成的点云较稀疏，三次径向基核函数插值能够补全缺失区域，改进后的 RBF 曲面插值进一步使填补结果与巷道曲面形态融合。定量结果见表 2。

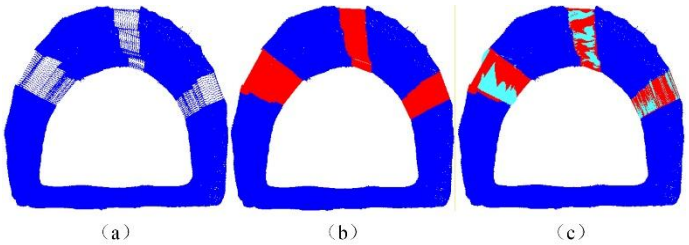

图 3 不同插值方法的孔洞修复结果

Fig. 3 Hole Repair Results Using Different Interpolation Methods

表 2 不同孔洞修复方法的精度对比

Table 2 Accuracy Comparison of Different Point Cloud Hole-Filling Methods

孔洞区域	修复方法	倒角距离 CD(mm)	豪斯多夫距离 HD(mm)	平均法向偏差 MND(°)	点数偏差率 PCD(%)
孔洞 a	泊松重建法	2.98	7.24	5.91	8.7
	三角化方法	4.15	10.33	8.42	18.5
	本文方法	1.86	4.62	3.74	3.2
孔洞 b	泊松重建法	3.67	9.85	7.23	11.4
	三角化方法	5.88	14.72	12.56	25.3
	本文方法	2.14	5.89	4.51	4.7
孔洞 c	泊松重建法	4.42	11.63	8.86	14.5
	三角化方法	6.94	17.45	15.33	28.6
	本文方法	2.37	6.74	5.02	5.1
孔洞 d	泊松重建法	4.15	10.92	8.14	13.2
	三角化方法	6.21	15.89	13.78	26.4
	本文方法	2.03	5.47	4.18	3.9
孔洞 e	泊松重建法	4.31	11.28	8.53	14.1
	三角化方法	6.57	16.74	14.62	27.8
	本文方法	2.21	6.12	4.67	4.4
五区域平均	泊松重建法	3.91	10.18	7.73	12.4
	三角化方法	5.95	15.03	12.94	25.3
	本文方法	2.12	5.77	4.42	4.3

3 讨论

本文方法的平均 CD 为 2.12mm，较泊松重建法和三角化方法分别降低 45.8%和 64.4%；平均 HD

为 5.77mm，分别降低 43.3%和 61.6%。平均 MND 为 4.42°，PCD 为 4.3%，说明填补曲面与真值贴合更紧密，法向过渡及点云密度一致性更好。各模拟孔洞的 CD 均低于 2.4mm、HD 均低于 7mm，表明方法能够适应规则、狭长及不规则孔洞。

通过多谐波 RBF 曲面插值，在保持与原始点云密度一致的前提下生成填补点云，有效恢复了巷道壁面的几何连续性。结果表明，该方法在孔洞检测完整性、边界闭合及填补密度一致性方面具有工程可行性。

4 结论

（1）针对地下不规则巷道点云的孔洞修复问题，提出自适应密度约束边界检测与 RBF 隐式曲面插值相结合的方法。通过密度与角度双层过滤提取边界，结合聚类、凹包与人机交互构建闭合轮廓，再将填充点投影至隐式曲面，恢复孔洞区域的几何连续性。

（2）实验中，平均 CD、HD、MND 和 PCD 分别为 2.12mm、5.77mm、4.42°和 4.3%，优于泊松重建法与三角化方法。

（3）对于曲率剧烈变化、低密度区域等复杂孔洞，修复效果仍有提升空间，后续将进一步提高方法的普适性。

参考文献

[1] 陈东.面向三维重建的不规则巷道壁点云自动提取与孔洞修复方法研究[D].山东科技大学,2026.

[2] 崔文,陈辉,刘万泉.激光三角网格点云孔洞曲面修补方法[J].激光与光电子学进展,2021,58(20):344-355.

[3] Dinesh C, Bajic I V, Cheung G. Adaptive non-rigid inpainting of 3D point cloud geometry[J]. IEEE Signal Processing Letters, 2018, 25(06): 878-882.

[4] 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 7th Symposium on Information and Communication Technology. New York, the United States, 2016: 331-338.

[5] 陈飞舟,陈志杨,丁展,等.基于径向基函数的残缺点云数据修复[J].计算机辅助设计与图形学学报,2006,(9):1414-1419.

[6] Fortes M A, González P, Palomares A, et al. Fitting and filling of 3D datasets with volume constraints using radial basis functions under tension[J]. Journal of Computational and Applied Mathematics, 2023, 420: 114841.

[7] Zhang C, Zhou H, Duan J. A method for identifying and repairing holes on the surface of unorganized point cloud[J]. Measurement, 2023, 210: 112575.

[8] Zhang C, Zhou H, Ju X, et al. A point cloud hole spiral-filling method based on 2D and 3D data fusion[J]. Measurement, 2023, 223: 113788.

[9] Xie Y, Xie X, Wang Y, et al. Terrain point cloud inpainting via signal decomposition[J]. Computers & Graphics, 2024, 120: 103915.

[10] FAN H, SU H, Guibas L J. A Point Set Generation Network for 3D Object Reconstruction from a Single Image[C]//Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Honolulu: IEEE, 2017: 605-613.

[1] **第 1 作者简介：**杨立克（1996-），男，学士，助理工程师，研究方向：测绘工程。E-mail: 15565343333@163.com。

[*]**通讯作者简介：**王晓杰（2000-），男，山东科技大学在读，研究方向：地下空间点云数据处理。E-mail: 19819199219@163.com。