



Universidade de Santa Catarina
Centro de Ciências Tecnológicas – CCT

Reconstrução de Superfícies 3D a Partir de Nuvens de Pontos: Uma Análise Comparativa

João Pedro Felicio Prudencio
Leandro Ribeiro Rittes
Professor Roberto Silvio Ubertino
Rosso Junior
11/06/2025

Sumário

- Introdução
- Metodologia de Busca
- Método 1: Triangulação
- Método 2: Volumétrico
- Método 3: Funções Implícitas
- Método 4: Deep Learning
- Análise Geral dos Métodos
- Conclusão
- Referências

Introdução

- **Nuvens de Ponto**
 - **O Que São:** Conjunto de **coordenadas (X, Y, Z)** amostras da **superfície** de um objeto.
 - **Natureza:** Não possuem **conexão** (sem "pele" ou "superfície" contínua).
- **Reconstrução 3D**
 - **Definição:** Transformar objetos e ambientes reais em **representações computacionais 3D**.
 - **Aplicações:** Realidade virtual/aumentada, medicina, robótica, arqueologia.

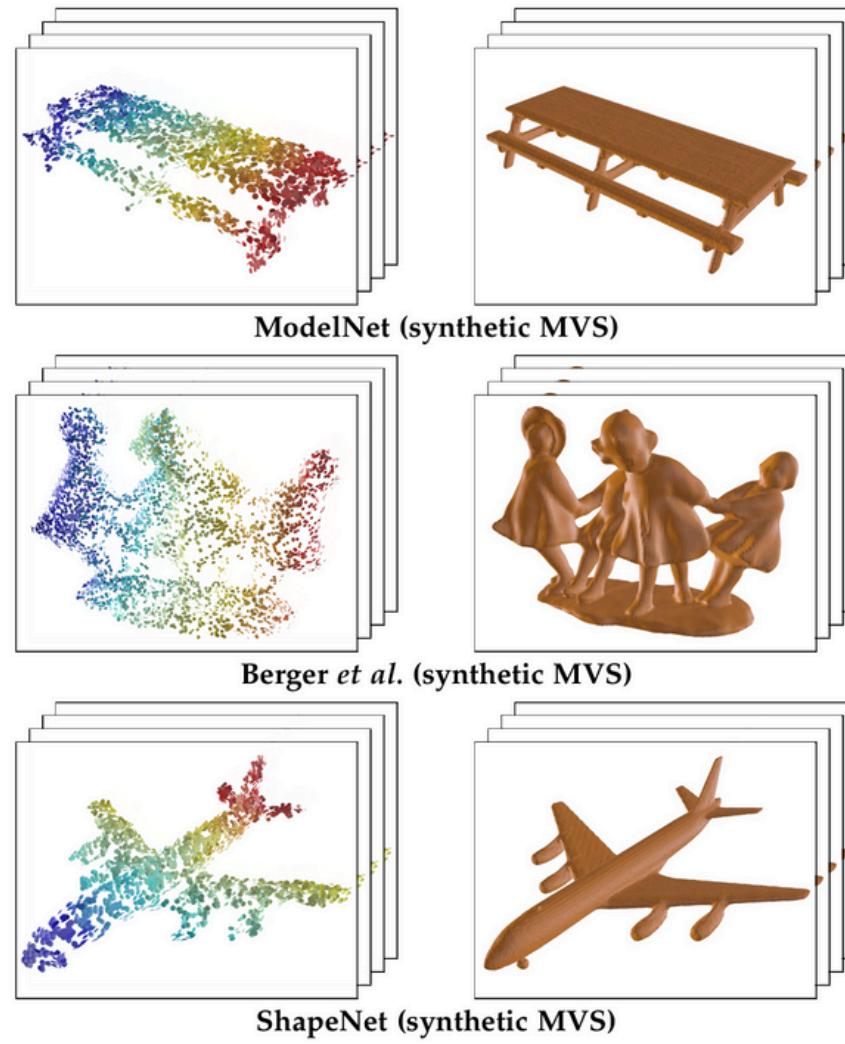


Fonte: Sulzer et al. (2023) (Adaptada)

Introdução



Fonte: Sulzer et al. (2023) (Adaptada)



Fonte: Sulzer et al. (2023)

Metodologia de Busca

- Abordagem: **Revisão bibliográfica sistemática.**
- Bases de Dados Consultadas:
 - **IEEE Xplore:** Foco em **engenharia e ciência da computação.**
 - **Google Scholar:** Apoio para **ampliar resultados.**
 - **Web of Science:** Rigor e cobertura **multidisciplinar.**
- Critérios de Inclusão:
 - Abordar método de **reconstrução 3D de nuvem de pontos.**
 - Enquadrar-se nas **4 categorias de métodos.**
 - Apresentar **estudo de caso, experimento ou exemplo prático.**

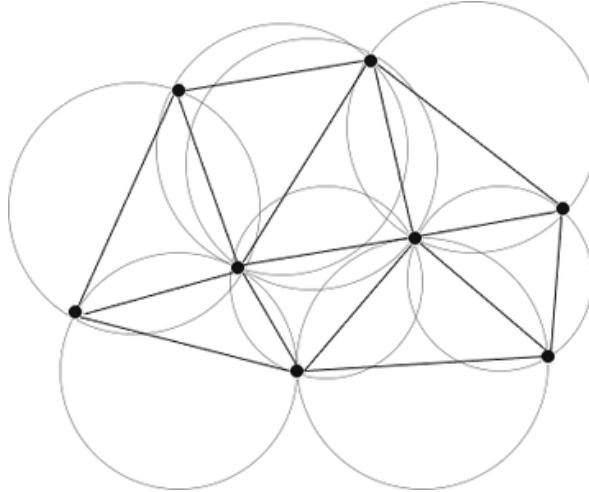
Metodologia de Busca

Quatro **strings de busca** específicas para cada tipo de método:

- "3D reconstruction" OR "surface reconstruction" AND "point cloud" OR "3D scanning" AND **triangulation** AND "case study" OR application OR evaluation
- "3D reconstruction" OR "surface reconstruction" AND "point cloud" OR "3D scanning" AND **volumetric** AND "case study" OR application OR evaluation
- "3D reconstruction" OR "surface reconstruction" AND "point cloud" OR "3D scanning" AND **"implicit function"** OR **"implicit surface"** AND "case study" OR application OR evaluation
- "3D reconstruction" OR "surface reconstruction" AND "point cloud" OR "3D scanning" AND **"deep learning"** AND "case study" OR application OR evaluation

Método 1: Triangulação

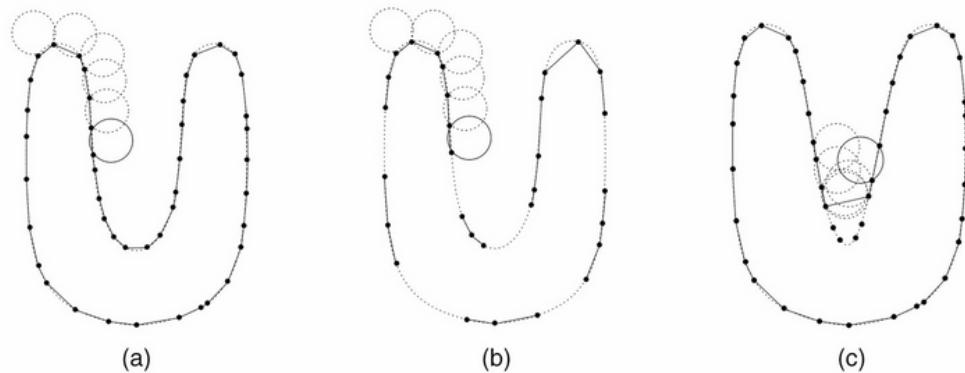
- **Princípio:** Conectar pontos da nuvem para formar uma malha de triângulos.
- **Funcionamento:**
 - Triangulação de **Delaunay**: Divide o espaço em **tetraedros**; a superfície é **extraída** das fronteiras.
 - **Ball-Pivoting Algorithm (BPA)**: Simula uma **esfera rolando** sobre a nuvem, formando **triângulos** ao tocar 3 pontos.



Fonte: O Autor (2025)



Fonte: Bernardini et al. (1999)



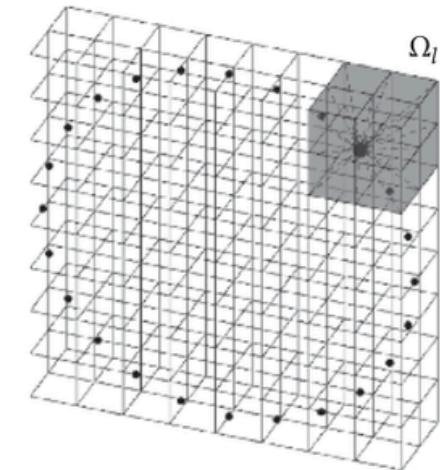
Fonte: Bernardini et al. (1999)

Método 1: Triangulação

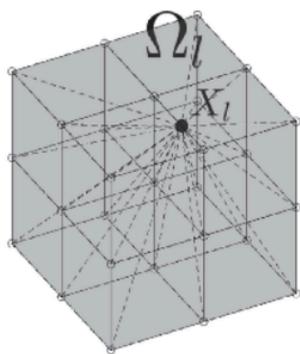
Critério	Miao et al. (2019)	Lv et al. (2021)	Bernardini et al. (1999)
Proposta	Reconstruir superfícies detalhadas com precisão e robustez	Medir peças durante a impressão 3D em tempo real	Criar malhas de forma simples e eficiente a partir de escaneamentos
Contexto de aplicação	Reconstrução multivista (várias fotos de cenas reais)	Ambientes industriais e impressoras 3D	Digitalização 3D de esculturas e objetos físicos reais
Como funciona	Triangulação, corte de grafo e ajuste por imagens	Extração de pontos em imagens + SFM + triangulação de Delaunay	Esfera gira entre pontos para formar triângulos sucessivos
Tecnologias envolvidas	Delaunay, dual graph, corte de grafo, Laplace, similaridade de imagem	FFT-SIFT, AKAZE, Structure from Motion (SFM), Delaunay	Ball Pivoting, conceito próximo de alpha-shapes
Datasets utilizados	Castle, Castle-Entry, Fountain, Herzjesu	Peças reais impressas com impressora 3D (ambiente controlado)	Esculturas digitalizadas (ex: Pietà de Michelangelo)
Métricas de avaliação	Comparação com modelos reais, visualização, precisão geométrica	Erro relativo (0,014%) e tempo de resposta	Avaliação visual e conectividade da malha final
Resultados práticos	Malhas mais completas, detalhadas e resistentes a ruído	Reconstrução precisa e rápida para controle em tempo real	Malhas eficientes com milhões de pontos e robustas a ruído leve
Limitações	Alto custo computacional e ajuste delicado de parâmetros	Funciona melhor em ambientes controlados com objetos simples	Sensível ao tamanho da esfera e à densidade dos pontos

Método 2: Volumétrico

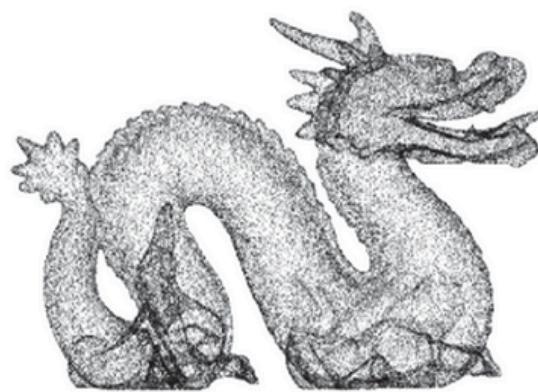
- **Princípio:** Transforma o espaço em uma **grade de voxels** (unidades cúbicas 3D).
- **Funcionamento:** Cada voxel **armazena informações** (e.g., distância à superfície); a superfície é a **fronteira** entre regiões "internas" e "externas".



Fonte: Jeong et al. (2018)



Fonte: Jeong et al. (2018)



(a)

Fonte: Jeong et al. (2018)



(b)



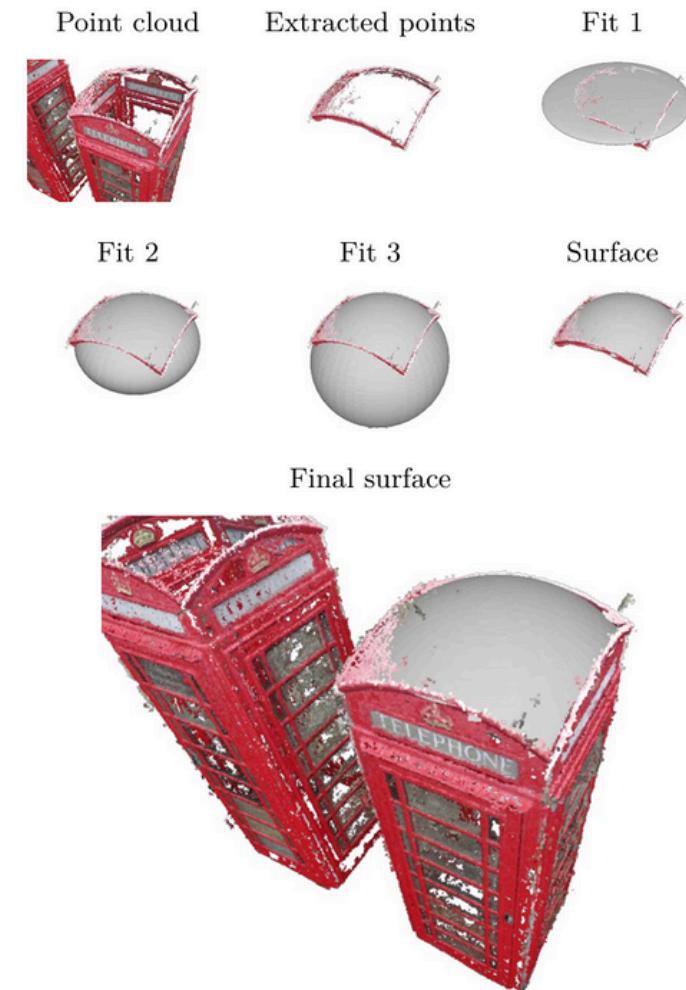
(c)

Método 2: Volumétrico

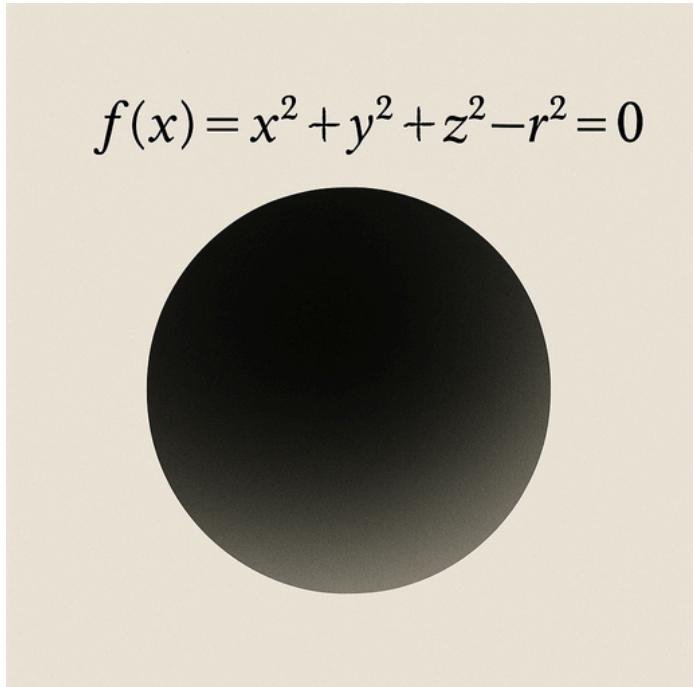
Critério	Ochmann et al. (2019)	Hou et al. (2019)	Jeong et al. (2018)
Proposta	Modelo 3D completo de prédios com volumes conectados	Melhorar escaneamento com mapas de ocupação e Gibbs Sampler	Usar campo de fase para formar volumes a partir de nuvens de pontos
Contexto de aplicação	Reconstrução de interiores de edifícios (BIM)	Inspeção industrial e reconstrução com robôs	Reconstrução geral a partir de dados simulados ou escaneados
Como funciona	Detecta planos, segmenta cômodos e resolve equações de otimização	Usa mapas de voxels e escolhe o próximo ponto de vista com base na incerteza	Evolui uma função matemática até formar a superfície desejada
Tecnologias principais	RANSAC, segmentação por visibilidade, programação inteira	Octree, mapas de ocupação, Markov Chain Monte Carlo (Gibbs)	Campo de fase, indicadores de borda, métodos explícitos
Datasets utilizados	Escaneamentos reais de prédios internos	Robôs e sensores industriais, ambientes reais	Modelos geométricos simulados e malhas simples
Métricas de avaliação	Coerência do modelo, conectividade entre cômodos	Grau de incerteza, completude do modelo, entropia	Avaliação visual e estabilidade numérica
Resultados práticos	Modelos conectados e exportáveis para BIM	Reconstrução mais precisa e eficiente, mesmo sem modelo prévio	Superfícies contínuas e estáveis, com menos artefatos
Limitações	Custo computacional e dependência da segmentação inicial	Exige muito cálculo para grandes volumes e mapas	Pouca avaliação quantitativa e limitação com formas complexas

Método 3: Funções Implícitas

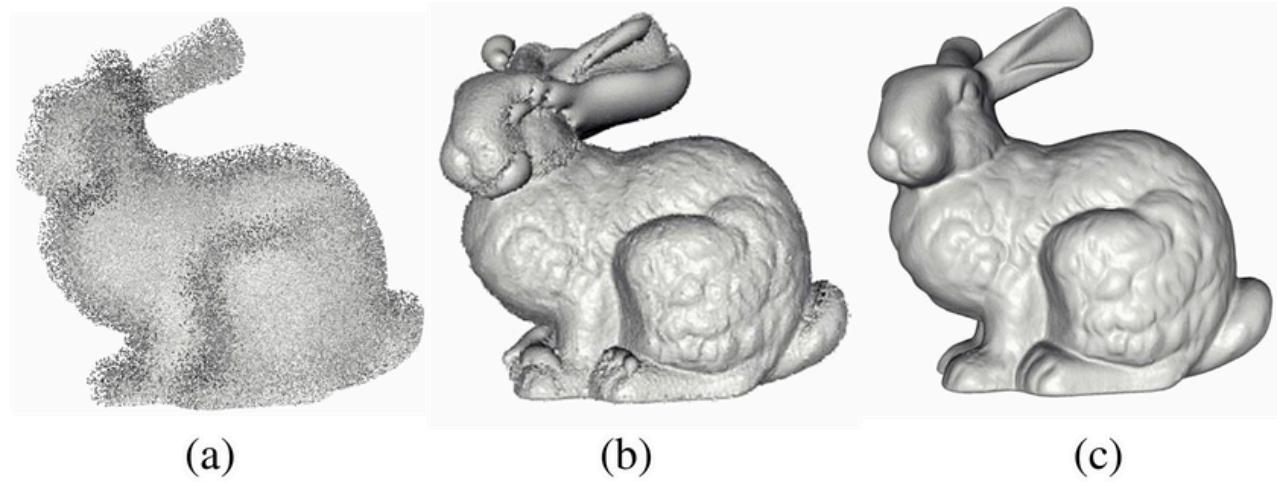
- **Princípio:** Define a superfície 3D como o conjunto de pontos onde uma **função $f(x,y,z)$** é igual a **zero**.
- **Funcionamento:** Inferir essa **função** a partir da nuvem de pontos, garantindo que os pontos **estejam na superfície** ou próximos.
- **Exemplos:**
 - **Poisson Surface Reconstruction:** Se baseia nas normais dos pontos.
 - **Superfícies de Nível Radial (RBFs):** Interpola a função implícita.



Método 3: Funções Implícitas



Fonte: O Autor (2025)



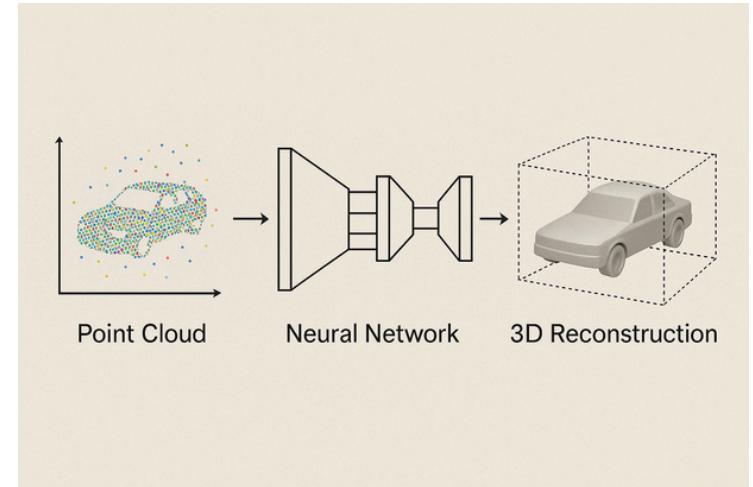
Fonte: Yang et al. (2008)

Método 3: Funções Implícitas

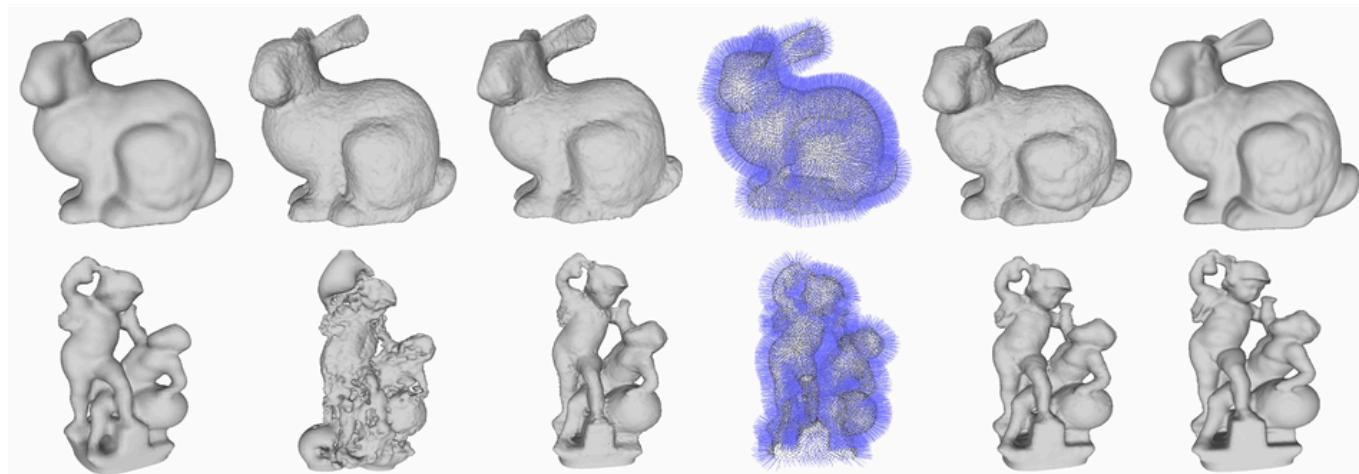
Critério	Funk et al. (2013)	Yang et al. (2007)	Beale et al. (2016)
Proposta	Superfície suave a partir de regiões locais com ajuste robusto	Reconstrução de alta qualidade com filtragem e funções radiais	Ajuste de superfícies simples (quadrics) com estatística bayesiana
Contexto de aplicação	Ambientes internos escaneados por sensores ruidosos	Escaneamentos 3D com ruído e outliers (ex: objetos complexos)	Modelagem com poucos pontos e formas geométricas simples
Como funciona	Divide em blocos locais, ajusta planos com 11-regularização, combina com kernel	Aplica mean shift, divide em Octree, usa RBF + Partition of Unity	Usa inferência bayesiana para ajustar superfícies quadráticas
Tecnologias envolvidas	Surfels, regressão esparsa, kernel Gaussiano	Mean shift, RBF, PoU, subdivisão espacial	Probabilidade bayesiana, quadric fitting, regularização com prior
Datasets utilizados	Dados sintéticos (Blender) e câmera estéreo real	Bunny, Dragon (Stanford), escaneamentos com ruído	Formas simuladas e dados reais com poucos pontos
Métricas de avaliação	Avaliação visual, robustez e completude	Avaliação visual, tempo de execução, controle de erro por limiar	Distância de Hausdorff, fidelidade da forma ajustada
Resultados práticos	Boa reconstrução mesmo com ruído e buracos	Alta qualidade visual, com remoção eficaz de ruídos e outliers	Ajuste eficiente com poucos dados, respeitando a forma esperada
Limitações	Pequenos buracos entre blocos e custo computacional	Processo de filtragem é demorado; falta de métricas quantitativas	Limitado a formas simples (esferas, cilindros, parábolas)

Método 4: Deep Learning

- **Princípio:** Redes neurais aprendem diretamente representações e características de **grandes bases de dados**.
- **Funcionamento:** Mapeiam nuvens de pontos para superfícies 3D, usando:
 - **Geração direta de malhas.**
 - Aprendizado de funções implícitas (**SDFs**).
 - Reconstrução por **voxels**.
 - Processamento direto de nuvens (**PointNet, PointNet++**).



Fonte: O Autor (2025)



Fonte: Sharma et al. (2021)

Método 4: Deep Learning

Critério	Sharma et al. (2021)	Li et al. (2019)	Kada (2022)
Proposta	Upsampling de nuvens de pontos com predição de normais	Super-resolução e preenchimento de imagens de profundidade	Reconstrução de telhados simples a partir de nuvem de pontos
Contexto de aplicação	Reconstrução geral de superfícies com dados esparsos	Cenas internas com câmeras RGB-D (ex: robótica, AR)	Modelagem de edifícios a partir de dados aéreos (urbanismo)
Como funciona	Extrai características e gera novos pontos e normais usando redes baseadas em PointNet++	Pipeline em três etapas: super-resolução, extração de normais/bordas e otimização com base na imagem RGB	Segmenta faces do telhado e estima inclinações com ConvPoint e PointNet
Tecnologias envolvidas	PointNet++, MLPs, Chamfer Distance, Euclidean Loss	DlapSRN, FCNs baseadas em VGG-16, perda híbrida com dados RGB e de profundidade	ConvPoint, PointNet, modelagem por semi-espaços (half-space modeling)
Datasets utilizados	Sintéticos e reais para nuvem de pontos (ex: PointNet++)	NYU-v2, ICL-NUIM, SUNCG-RGBD, Middlebury, ToFMark	RoofN3D (118 mil edifícios com anotações de telhado)
Métricas de avaliação	Chamfer Distance, perda por vizinhança, erro de normais	RMSE (mm e pixels), acurácia de pose da câmera	IoU, erro angular (MAE), acurácia da presença das faces
Resultados práticos	Nuvens mais densas e suaves, com normais consistentes	Reconstrução com maior fidelidade geométrica e visual	Alta precisão para telhados com formas simples
Limitações	Suaviza detalhes em bordas afiadas	Dependente da qualidade da imagem RGB auxiliar	Restrito a telhados retangulares com até quatro faces

Análise Geral dos Métodos

Critério	Triangulação	Volumétrico	Funções Implícitas	Deep Learning
Cenário em que se destaca	Escaneamento cultural e fotogrametria (ex: monumentos)	Arquitetura, engenharia e inspeção industrial com robôs	Reconstrução local com ruído e dados incompletos	Upsampling e reconstrução de padrões geométricos
Precisão	Alta com múltiplas visões e refinamento fotométrico	Alta com segmentações bem feitas	Boa para formas simples; depende da função usada	Pode ser muito alta com redes bem treinadas
Velocidade	Média; pode ser lenta com refinamento e múltiplas imagens	Lenta, devido a otimizações volumétricas	Boa em métodos diretos; lenta com pré-processamentos	Alta na inferência; lenta no treinamento
Eficiência Computacional	Média a baixa em métodos refinados	Baixa, especialmente com voxels em grande escala	Variável; alguns métodos são eficientes	Alta na execução; exige GPU para treinar
Topologias complexas	Moderada, depende da densidade da malha	Alta, especialmente em espaços bem estruturados	Limitada a superfícies suaves ou primitivas	Alta com redes adaptadas para formas variadas
Robustez a ruído	Boa com visibilidade e refinamento por deformação	Boa com estratégias probabilísticas como Gibbs	Muito boa com filtragem e regularização	Alta se treinado com ruído nos dados
Preservação de detalhes	Excelente com mapeamento de texturas e ajustes finos	Moderada; depende da resolução dos voxels	Boa em regiões densas; limitada por suavização	Pode perder detalhes em regiões com bordas afiadas
Preenchimento de buracos	Limitado; falha em regiões pouco densas	Excelente; cobre regiões não visíveis	Bom em geral, mas pode deixar falhas entre blocos	Muito bom se houver dados semelhantes no treinamento
Vantagens	Simples, interpretável, boa malha final	Gera modelos volumétricos completos	Superfícies suaves, boa com ruído	Adaptável, escalável, excelente com grandes bases
Limitações	Sensível a parâmetros e pode deixar buracos	Computacionalmente custoso; exige segmentação precisa	Limitado a formas simples; falhas em junções complexas	Precisa de muitos dados e depende da base de treino

Conclusão

- **Triangulação:** Funciona bem com **dados densos e organizados**, mas pode **falhar** em áreas com **poucos pontos**.
- **Volumétrico:** Preenche falhas com **precisão**, mas é muito **custoso computacionalmente**.
- **Funções Implícitas:** Cria superfícies suaves **mesmo com ruído**, mas **não lida bem** com **formas muito complexas**.
- **Deep Learning:** Aprende com **exemplos**, se **adapta** a vários casos, mas precisa de **muitos dados** e treino.

Não há um “melhor método”.

Escolha depende de:

- Tipo de dado disponível
- Aplicação pretendida
- Requisitos de precisão, robustez e tempo

Referências

- [1] A. Khatamian and H. R. Arabnia, "Survey on 3D surface reconstruction," *Journal of Information Processing Systems*, vol. 12, no. 3, pp. 338–357, Sep. 2016.
- [2] C. Sulzer, A. Guajardo, B. Diehm, and J. Denzler, "A survey and benchmark of automatic surface reconstruction from point clouds," *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, vol. 29, no. 8, pp. 3668–3682, Aug. 2023.
- [3] F. Bernardini, J. Mittleman, H. Rushmeier, C. Silva, and G. Taubin, "The ball-pivoting algorithm for surface reconstruction," *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, vol. 5, no. 4, pp. 349–359, Oct.-Dec. 1999.
- [4] W. Miao, Y. Liu, X. Shi, J. Feng, and K. Xue, "A 3D surface reconstruction method based on Delaunay triangulation," in *Image Analysis and Recognition. ICIAR 2019. Lecture Notes in Computer Science*, vol. 11663, pp. 51–60, Springer, Cham, 2019.
- [5] L. Meng, Y. Zhu, S. Zhao, and Y. Wang, "A 3D surface reconstruction method for 3D printing process based on structured light vision," *Applied Sciences*, vol. 11, no. 17, p. 7961, Aug. 2021.
- [6] J. Yang, Z. Wang, C. Zhu, and Q. Peng, "Implicit surface reconstruction from scattered point data with noise," *International Conference on Intelligent Computing*, vol. 5227, pp. 744-753, 2008.
- [7] D. Jeong, Y. Li, H. J. Lee, S. M. Lee, J. Yang, S. Park, H. Kim, Y. Choi, and J. Kim, "Efficient 3D volume reconstruction from a point cloud using a phase-field method," *Mathematical Problems in Engineering*, vol. 2018, Article ID 7090186, 9 pages, 2018..

Referências

- [8] L. Hou, X. Chen, K. Lan, R. Rasmussen, and J. Roberts, "Volumetric next best view by 3D occupancy mapping using Markov chain Gibbs sampler for precise manufacturing," *IEEE Access*, vol. 7, pp. 121950–121960, Aug. 2019
- [9] S. Ochmann, R. Vock, and R. Klein, "Automatic reconstruction of fully volumetric 3D building models from point clouds," *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, vol. 158, pp. 18–31, Dec. 2019.
- [10] E. Funk, L. S. Dooley, A. Boerner, and D. Griessbach, "Implicit scene modelling from imprecise point clouds," *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, vol. XL-4/W4, pp. 7–11, Dec. 2013.
- [11] D. Beale, Y. L. Yang, N. Campbell, D. Cosker, and P. Hall, "Fitting quadrics with a Bayesian prior," *Computational Visual Media*, vol. 2, no. 2, pp. 107–117, Jun. 2016.
- [12] J. Li, W. Gao, and Y. Wu, "High-quality 3D reconstruction with depth super-resolution and completion," *IEEE Access*, vol. 7, pp. 19371–19381, Jan. 2019.
- [13] R. Sharma, T. Schwandt, C. Kunert, S. Urban, and W. Broll, "Point cloud upsampling and normal estimation using deep learning for robust surface reconstruction," in *Proceedings of the International Conference on 3D Vision (3DV)*, pp. 1–10, Dec. 2021.
- [14] M. Kada, "3D reconstruction of simple buildings from point clouds using neural networks with continuous convolutions (ConvPoint)," *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, vol. XLVIII-4/W4-2022, pp. 61–68, Oct. 2022.