深蓝学院
shenlanxueyuan.com

计算机视觉课程

——基于图像的三维模型重建(下)

主讲人 隋博士

课程内容

深蓝学院
shenlanxueyuan.com

- ✓基于光度一致性的网格细节优化
  - ✓基础知识
  - ✓数学模型
- ✓全自动的纹理图像创建
  - ✓网格参数化
  - ✓视角选择
  - ✓纹理图像拼接与编辑

真实感绘制的基本要素

高精度的三维模型

真实感绘制技术

精致的纹理模型

合理的光照

基于光度一致性的网格细节优化

深蓝学院 shenlanxueyuan.com

动机：原始的网格存在噪声或者空洞，无法捕捉场景细节

思路：采用变分多视角立体技术，构建能量函数，将初始的网格作为初始值，进行梯度下降优化

基于光度一致性的网格细节优化

深蓝学院 shenlanxueyuan.com

基础知识—连续梯度流离散化

连续曲面上定义能量偏导

与任务有关的梯度

$$DE(S)\boxed{[v]} = \left.\frac{\partial E(S+\epsilon\, v)}{\partial \epsilon}\right|_{\epsilon=0} = \int_S \boxed{\nabla E(x)}\, v(x)\, dx.$$

定义在连续曲面上的梯度场

J.-P. Pons, R. Keriven, and O. Faugeras, “Multi-View Stereo Reconstruction and Scene Flow Estimation with a Global Image-Based Matching Score,” Int’l J. Computer Vision, vol. 72, no. 2,pp. 179-193, 2007

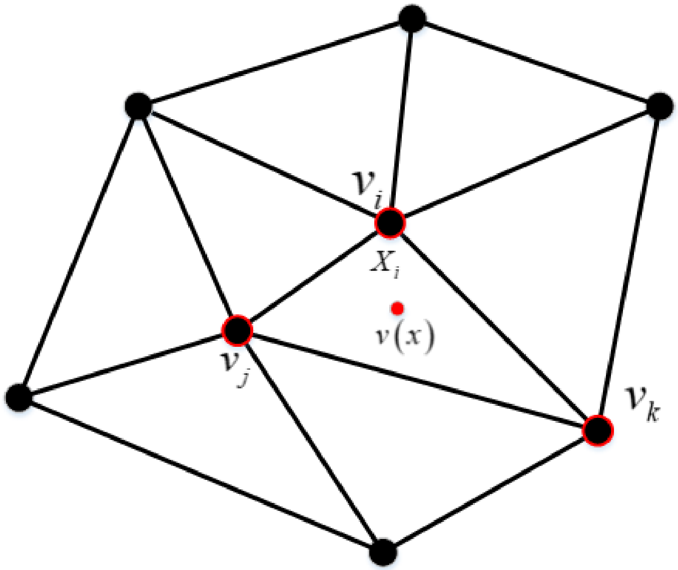
基于光度一致性的网格细节优化

基础知识—连续梯度流离散化

离散网格上的向量场

$$v(x) = \sum_i v_i \phi_i$$

- $\phi_i(x)$ 是重心坐标如果x 位于顶点 i 所在的三角形中；否则是0，$\sum_i \phi_i(x) = 1$



$$v(x) = \phi_i(x)v_i + \phi_j(x)v_j + \phi_k(x)v_k,$$

$$\phi_i(x) + \phi_j(x) + \phi_k(x) = 1$$

J.-P. Pons, R. Keriven, and O. Faugeras, “Multi-View Stereo Reconstruction and Scene Flow Estimation with a Global Image-Based Matching Score,” Int’l J. Computer Vision, vol. 72, no. 2,pp. 179-193, 2007

基于光度一致性的网格细节优化

基础知识—连续梯度流离散化

连续曲面上定义能量偏导数

$$DE(S)[v] = \left.\frac{\partial E(S + \epsilon\, v)}{\partial \epsilon}\right|_{\epsilon=0} = \int_S \nabla E(x) v(x) dx.$$

离散网格上的向量场

$$v(x) = \sum_i v_i \phi_i$$

离散网格上定义能量偏导数

$$DE(S)[v] = \sum_i v_i \int_S \phi_i(x) \nabla E(x) \mathrm{d}x.$$

J.-P. Pons, R. Keriven, and O. Faugeras, “Multi-View Stereo Reconstruction and Scene Flow Estimation with a Global Image-Based Matching Score,” Int’l J. Computer Vision, vol. 72, no. 2,pp. 179-193, 2007

基于光度一致性的网格细节优化

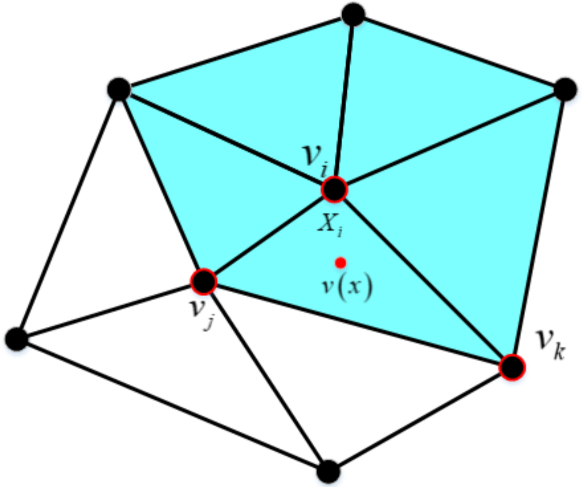
深蓝学院 shenlanxueyuan.com

基础知识—连续梯度流离散化

离散网格上定义能量

$$DE(S)[v] = \sum_i v_i \int_S \phi_i(x)\nabla E(x)\mathrm{d}x.$$

$$\frac{\mathrm{d}E(S)}{\mathrm{d}X_i} = \int_S \phi_i(x)\nabla E(x)\mathrm{d}x \qquad i \in [1, n]$$



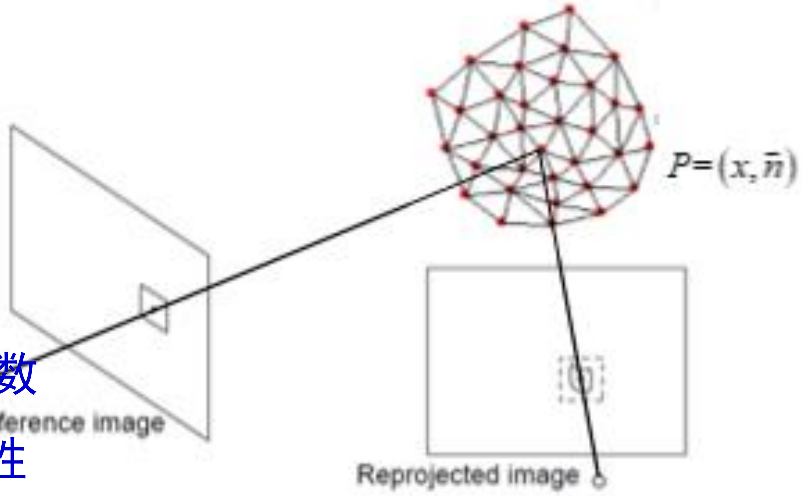
每个顶点的梯度相当于1-ring范围内所有点的梯度的加权和

J.-P. Pons, R. Keriven, and O. Faugeras, “Multi-View Stereo Reconstruction and Scene Flow Estimation with a Global Image-Based Matching Score,” Int’l J. Computer Vision, vol. 72, no. 2,pp. 179-193, 2007

基于光度一致性的网格细节优化

数学模型—基于空间patch

$$E_{\text{photo}}(S) = \sum_{i,j} \int_S v_{ij}^S(x)\, g_{ij}(x, \vec{n})\, \mathrm{d}S$$



- S 表示物体表面
- x 表示物体表面上一点,$\vec{n}$ 是其法向量
- $g_{ij}(I_i, I_j)(x, \vec{n})$ 是关于光度一致性的单调递减函数
- $v_{ij}^S(x) \in \{0, 1\}$ 表示表面上一点在图像上的可视性

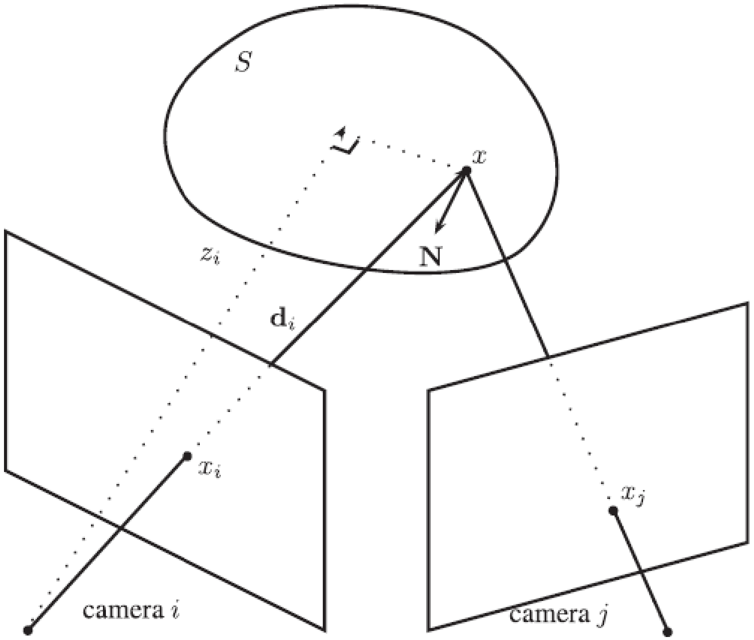
O. Faugeras and R. Keriven, “Variational Principles, Surface Evolution, PDE’s, Level Set Methods and the Stereo Problem,” IEEE Trans. Image Processing, vol. 7, no. 3, pp. 336-344, Mar. 1998.

基于光度一致性的网格细节优化

数学模型—基于重投影误差

$$E_{\text{error}}(S) = \sum_{i,j} \int_{\Omega_{ij}^S} h(I_i, I_{ij}^S)(x_i)\, \mathrm{d}x_i$$

- $h(I,J)(x)$ 表示在图像 I 和 J 之间在像素 x 处的光度一致性的单调递减函数
- $I_{ij}^S = I_j \circ \Pi_j \circ \Pi_i^{-1}$ 表示将图像 I_j 通过曲面重投影到图像 S 上
- $\bar{\Omega}_{ij}^S$ 表示重投影的有效域
- Π_i 和 Π_i^{-1} 分别表示图像的 i 投影和逆投影



J.-P. Pons, R. Keriven, and O. Faugeras, “Multi-View Stereo Reconstruction and Scene Flow Estimation with a Global Image-Based Matching Score,” Int’l J. Computer Vision, vol. 72, no. 2,pp. 179-193, 2007

基于光度一致性的网格细节优化

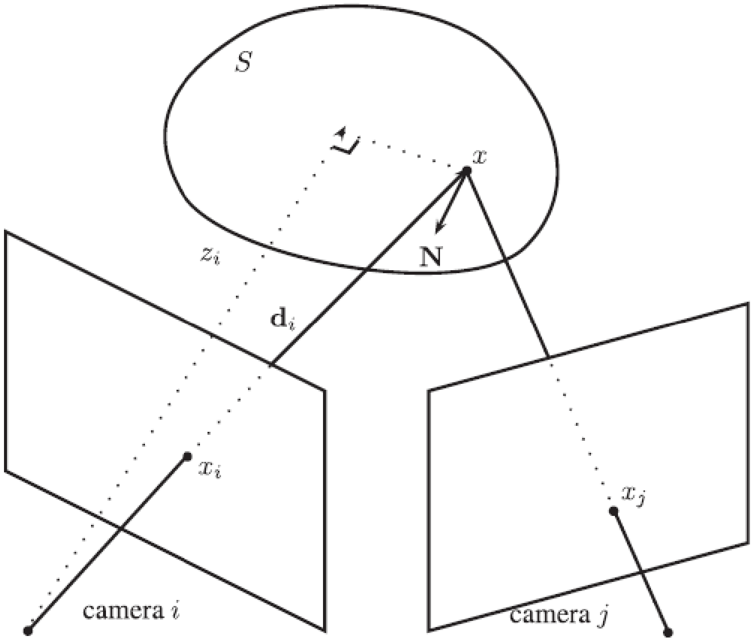
数学模型—离散化

$$\mathrm{E}_{\mathrm{error}}(S) = \sum_{i,j} \int_{\Omega_{ij}^S} h(I_i, I_{ij}^S)(x_i)\, \mathrm{d}x_i$$

$$\boxed{\begin{aligned} M(I,J) &= \textstyle\int_\Omega h(I,J)(x)\mathrm{d}x \\ \mathcal{M}_{ij}(S) &= M(I_i, I_{ij}^S) \end{aligned}}$$

$$\mathrm{E}_{\mathrm{error}}(S) = \textstyle\sum_{i,j} \mathcal{M}_{ij}(S)$$

$$\nabla \mathrm{E}_{\mathrm{error}}(S) = \textstyle\sum_{i,j} \nabla \mathcal{M}_{ij}(S)$$



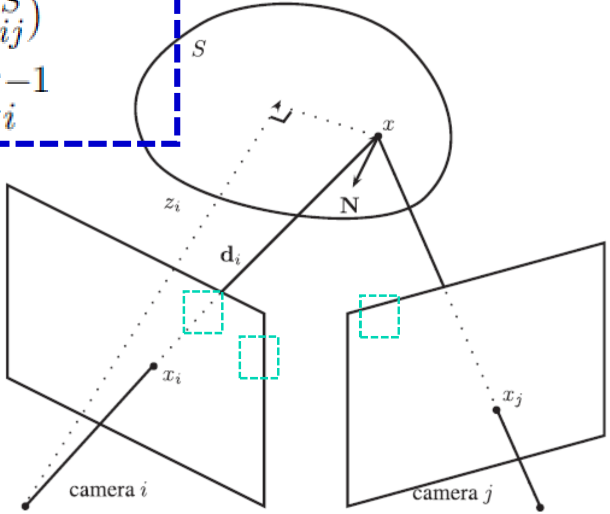
J.-P. Pons, R. Keriven, and O. Faugeras, “Multi-View Stereo Reconstruction and Scene Flow Estimation with a Global Image-Based Matching Score,” Int’l J. Computer Vision, vol. 72, no. 2,pp. 179-193, 2007

基于光度一致性的网格细节优化

深蓝学院 shenlanxueyuan.com

数学模型—离散化

$$\mathcal{M}_{ij}(S) = M(I_i, I_{ij}^S)$$
$$I_{ij}^S = I_j \circ \Pi_j \circ \Pi_i^{-1}$$



根据链式法则

$$\nabla \mathcal{M}_{ij}(x) = \partial_2 M(x_i) DI_j(x_j) D\Pi_j(x) D\Pi_i^{-1}(x_i) \frac{\mathrm{d}x_i}{\mathrm{d}x}$$

$$\boxed{\mathrm{d}x_i = -\mathbf{N}^T \mathbf{d}_i \mathrm{d}x / z_i^3}$$

$$\nabla \mathcal{M}_{ij}(x) = -\left[\partial_2 M(x_i) DI_j(x_j) D\Pi_j(x) D\Pi_i^{-1}(x_i) \frac{\mathbf{d}_i}{z_i^3}\right] \mathbf{N}$$

$$\boxed{\nabla \mathcal{M}_{ij}(x) = -f_{ij}(x_i)\, \mathbf{N} / z_i^3} \quad f_{ij}(x_i) = \partial_2 M(x_i) DI_j(x_j) D\Pi_j(x) D\Pi_i^{-1}(x_i) \mathbf{d}_i$$

J.-P. Pons, R. Keriven, and O. Faugeras, “Multi-View Stereo Reconstruction and Scene Flow Estimation with a Global Image-Based Matching Score,” Int’l J. Computer Vision, vol. 72, no. 2,pp. 179-193, 2007

网格模型优化

数学模型—离散梯度流

$$\frac{\mathrm{dE}_{\mathrm{error}}(S)}{\mathrm{d}X} = \int_S \phi(x) \sum_{i,j} \nabla \mathcal{M}_{ij}(x) \mathrm{d}x$$

$$= - \int_S \phi(x) \sum_{i,j} f_{ij}(x_i) \mathbf{N} / z_i^3 \mathrm{d}x$$

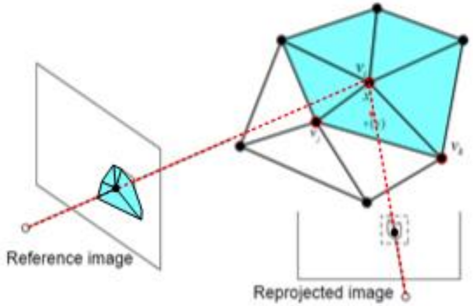
$$= - \sum_{i,j} \int_S \phi(x) f_{ij}(x_i) \mathbf{N} / z_i^3 \mathrm{d}x,$$

$$\boxed{\mathrm{d}x_i = -\mathbf{N}^T \mathbf{d}_i \mathrm{d}x / z_i^3}$$

$$= \sum_{i,j} \int_{\Omega_{ij}} \phi(x) f_{ij}(x_i) / z_i^3 \frac{z_i^3}{\mathbf{N}^T \mathbf{d}_i} \mathbf{N} \mathrm{d}x_i$$

$$\boxed{= \sum_{i,j} \int_{\Omega_{ij}} \phi(x) f_{ij}(x_i) / (\mathbf{N}^T \mathbf{d}_i) \mathbf{N} \mathrm{d}x_i}$$

$$\boxed{\frac{\mathrm{dE}(S)}{\mathrm{d}X_i} = \int_S \phi_i(x) \nabla \mathrm{E}(x) \mathrm{d}x \qquad i \in [1, n]}$$



顶点的梯度等于该点的1-ring区域在图像上的2D投影区域内所有像素的贡献的加权和

J.-P. Pons, R. Keriven, and O. Faugeras, "Multi-View Stereo Reconstruction and Scene Flow Estimation with a Global Image-Based Matching Score," Int'l J. Computer Vision, vol. 72, no. 2,pp. 179-193, 2007

基于光度一致性的网格细节优化

J.-P. Pons, R. Keriven, and O. Faugeras, “Multi-View Stereo Reconstruction and Scene Flow Estimation with a Global Image-Based Matching Score,” Int’l J. Computer Vision, vol. 72, no. 2,pp. 179-193, 2007

基于光度一致性的网格细节优化

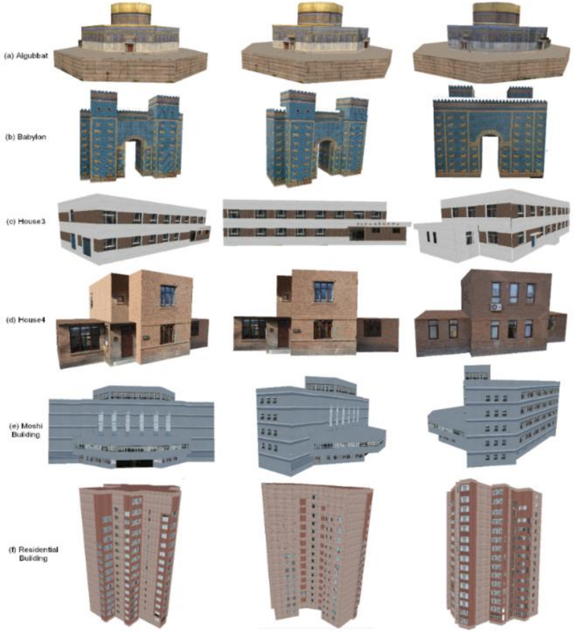
J.-P. Pons, R. Keriven, and O. Faugeras, “Multi-View Stereo Reconstruction and Scene Flow Estimation with a Global Image-Based Matching Score,” Int’l J. Computer Vision, vol. 72, no. 2,pp. 179-193, 2007

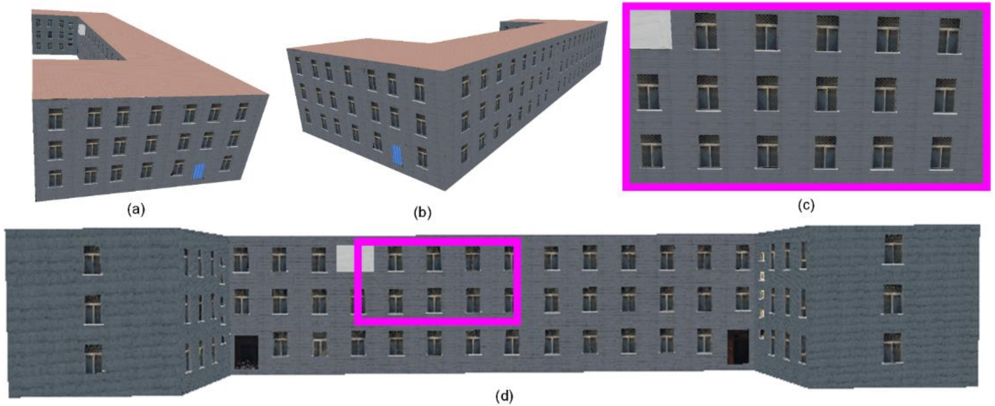
课程内容

- ✓基于光度一致性的网格细节优化
  - ✓基础知识
  - ✓数学模型
- ✓**全自动的纹理图像创建**
  - ✓网格参数化
  - ✓视角选择
  - ✓纹理图像拼接与编辑

全自动的纹理图像创建

纹理贴图

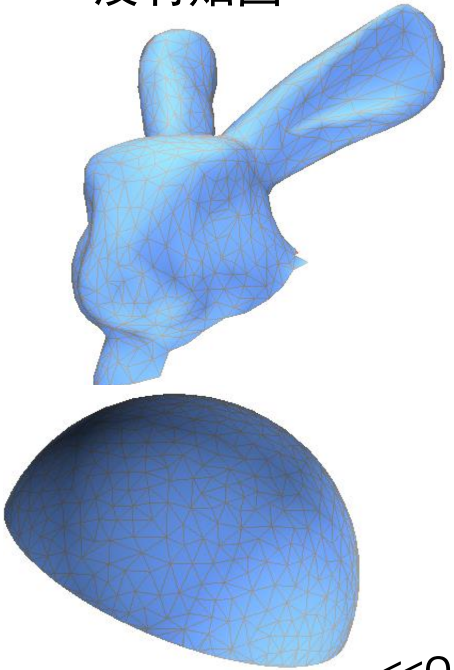




的纹理图像创建

图

有贴图



纹理贴图一

纹理贴图二

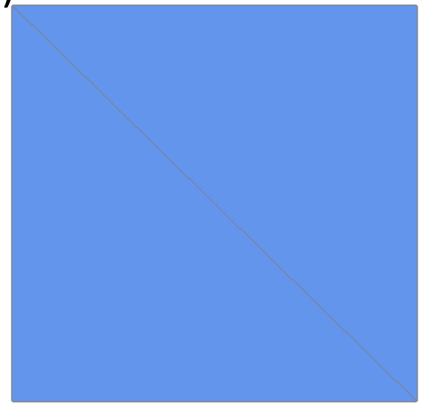
全自动的纹理图像创建

纹理坐标

$$\underset{\text{顶点坐标}}{(x, y, z)} \longrightarrow \underset{\text{纹理坐标}}{(u, v)}$$

三维网格

(0,0) (1,0)



(0,1) (1,1)

纹理图像

渲染效果

<<OpenGL三维渲染>> 赵辉 王晓玲

全自动的纹理图像创建

纹理坐标

顶点坐标

$$(x, y, z)$$

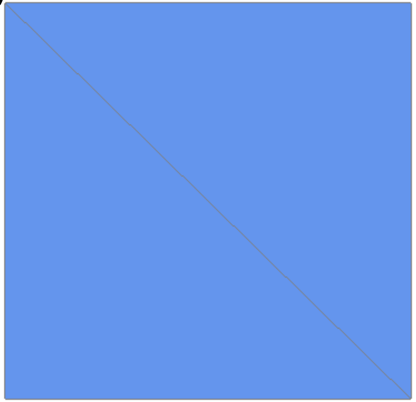
$$\longrightarrow$$

纹理坐标

$$(u, v)$$

三维网格

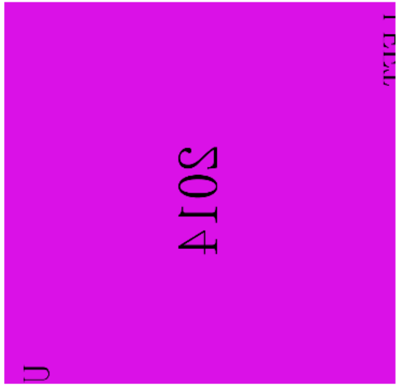
(0,0) (1,0)



(0,1) (1,1)

纹理图像

渲染效果

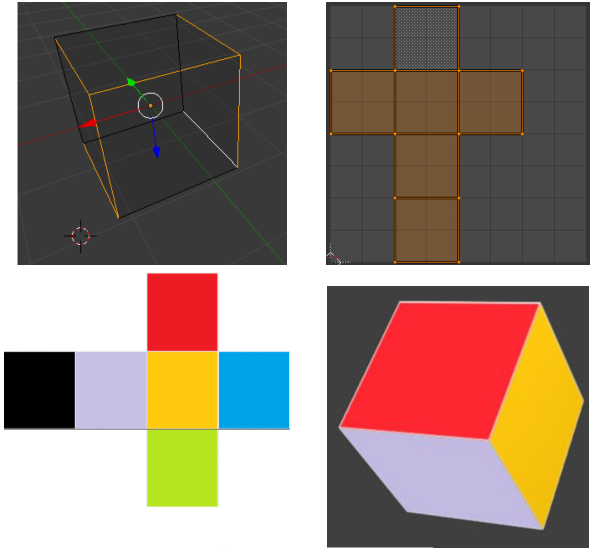


<<OpenGL三维渲染>> 赵辉 王晓玲

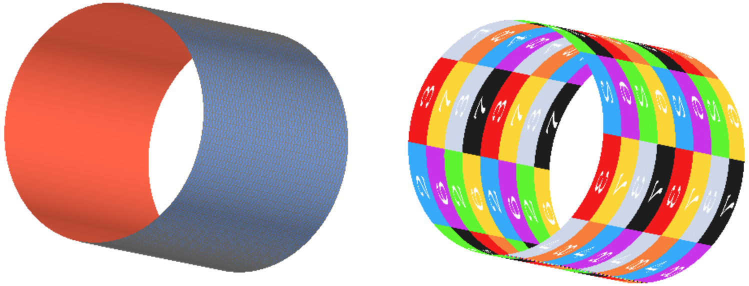
全自动的纹理图像创建

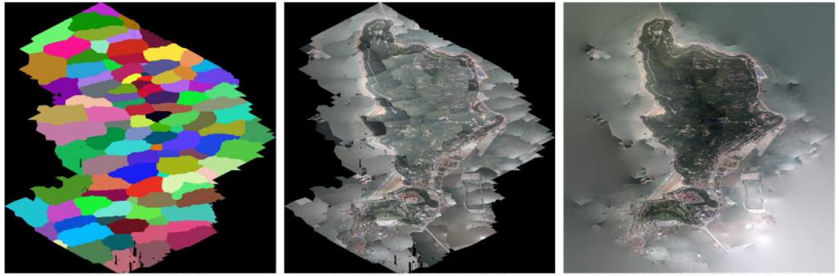
纹理图像的创建方式

交互软件



自动计算

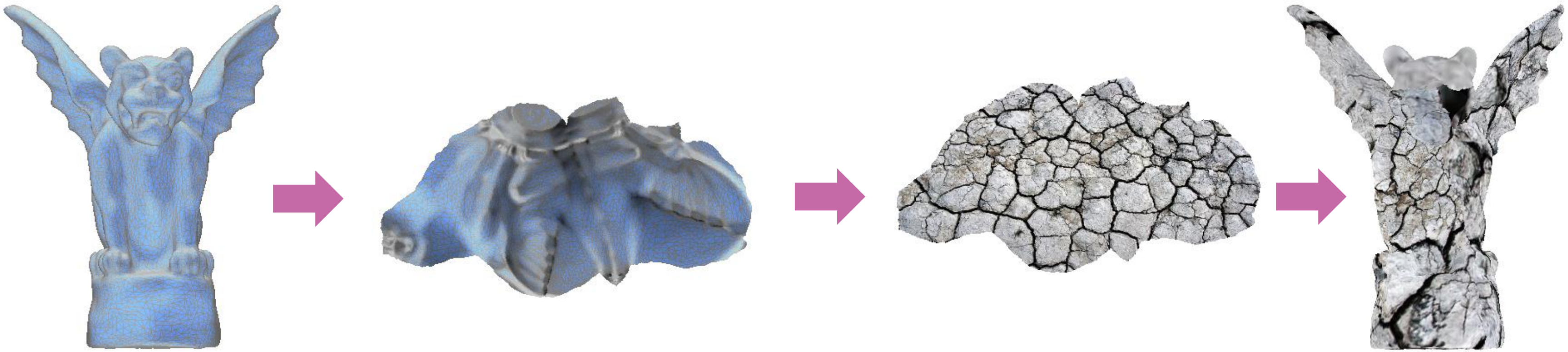




(a) 可视信息优化结果 (b) 创建的原始纹理图像 (c) 泊松图像编辑后的纹理图像

全自动的纹理图像创建

算法流程

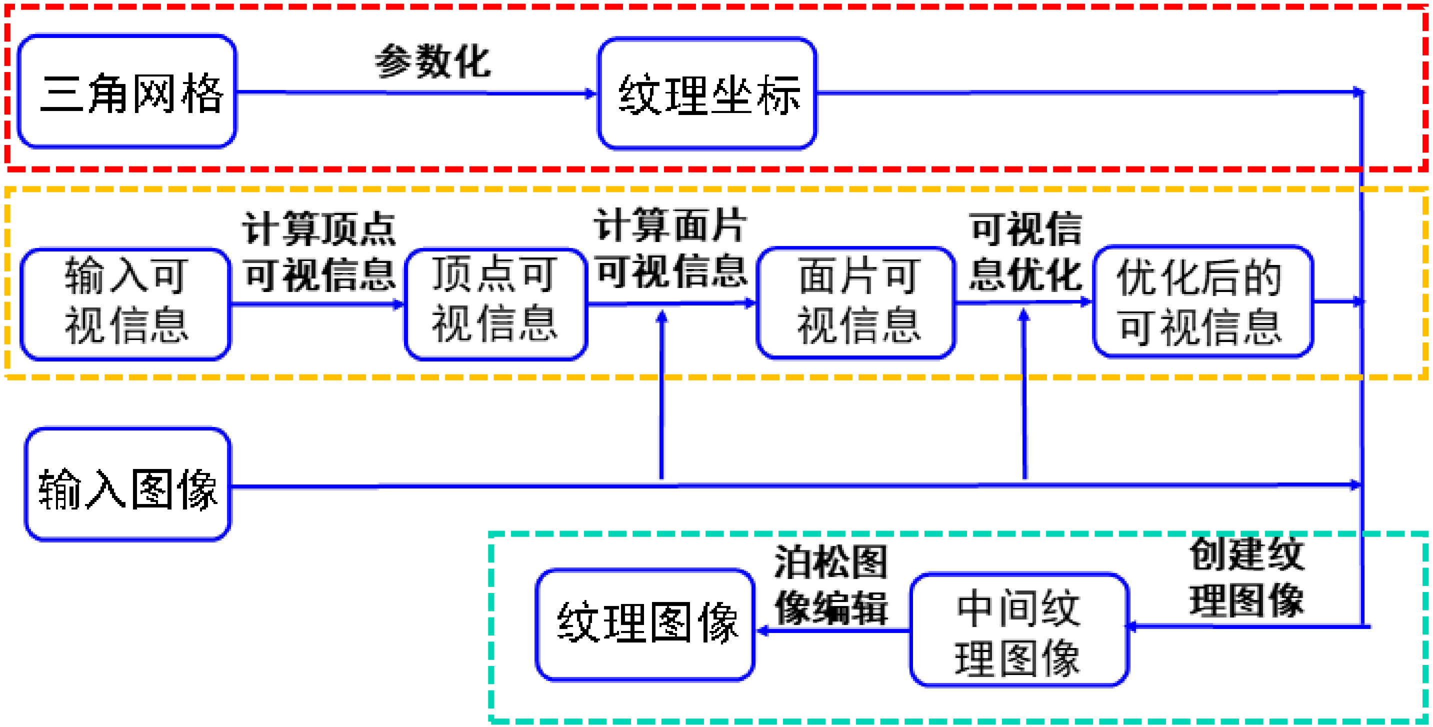


输入模型　　模型参数化　　纹理图像绘制　　纹理模型

<<三维模型参数化理论和实现>> 赵辉 王晓玲

全自动的纹理图像创建

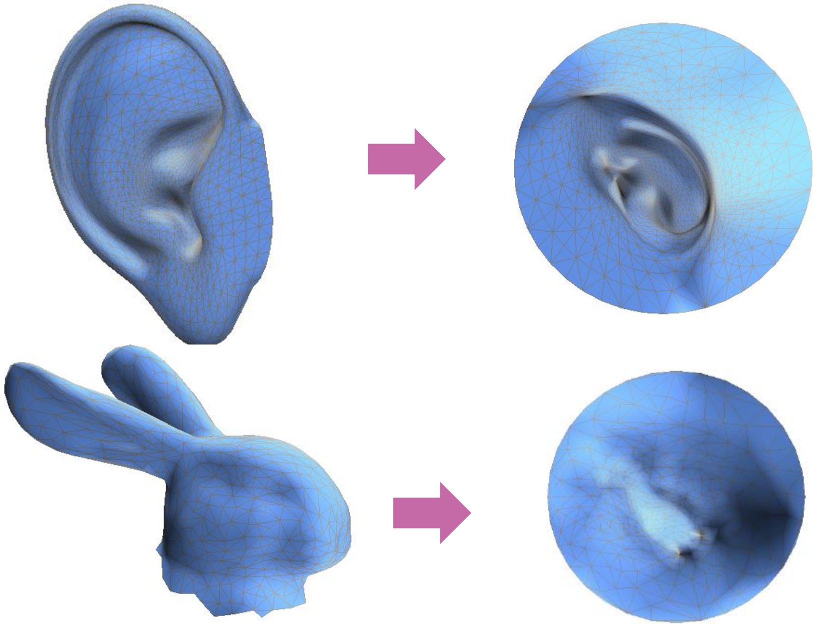
基于多视角的纹理图像创建流程



1. 网格参数化
2. 视角选择
3. 纹理图像创建与编辑

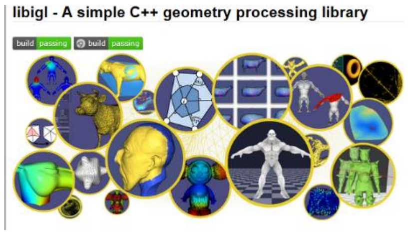
三维网格参数化

原理：参数化把位于三维空间的三维模型，通过构建相应的数学系统，映射到二维平面



计算机图形学中经典算法：

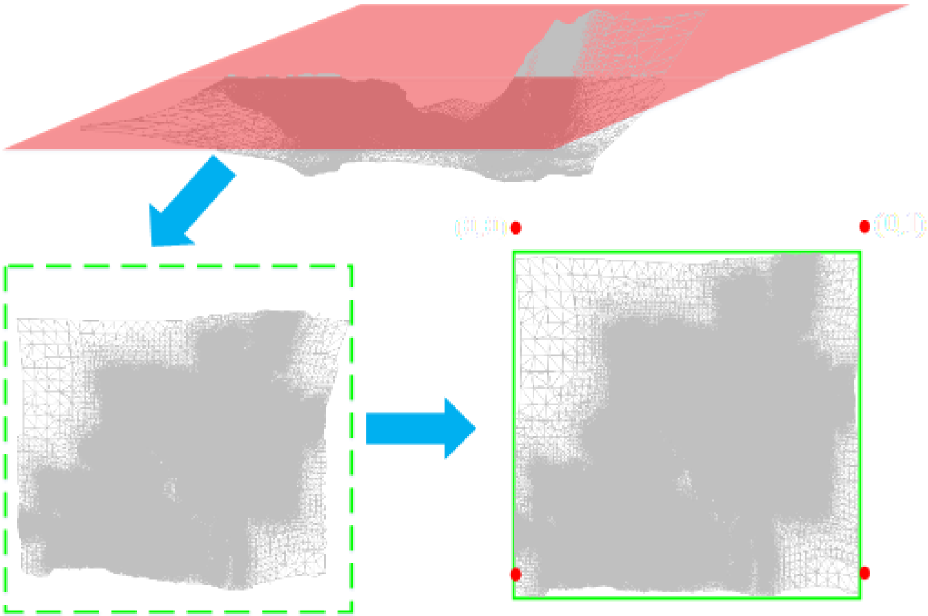
- LSCM（Least Square Conformal Maps）
- ASAP（As-similar-as-possible）
- ARAP（As-rigid-as-possible）



http://libigl.github.io/libigl/

三维网格参数化

UV参数（纹理坐标的获取）



算法流程：

PCA估计平面

↓

平面投影

↓

仿射变换

视角选择

公式： 所有的三角面片表示为$T=\{T_i\}_{i=1}^N$，对应的每个面片的可视信息表示为 $\mathbf{V}=\{\mathbf{V}_i\}_{i=1}^N$，其中$\mathbf{V}_i=\{v_{i1},v_{i2},\dots v_{ik_i}\}$，$k_i$ 表示该面片可视视角的个数，$\mathbf{L}=\{l_i\}_{i=1}^N$ 表示最终选择的可视信息，则能量函数可以表示为

$$E(\mathbf{L})=E_{data}(\mathbf{L})+\lambda E_{smooth}(\mathbf{L})$$

数据项 保证图像的细节

$$E_{data}(\mathbf{L})=\sum_{i=1}^{N}-\nabla(P_{l_i}(T_i))$$

$P_{l_i}(\bullet)$ 表示向第l_i个视角的投影

$\nabla(\bullet)$ 表示梯度操作

平滑项 保证局部一致性

$$E_{smooth}(\mathbf{L})=\sum_{i=1}^{N}\sum_{j\in N(i)}^{N}U(l_i,l_j),$$

其中，$U(l_i,l_j)=\begin{cases}0, & l_i=l_j,\\ \tau, & l_i\neq l_j.\end{cases}$

优化 采用graph-cut的方法进行优化，快速得到最优值

视角选择

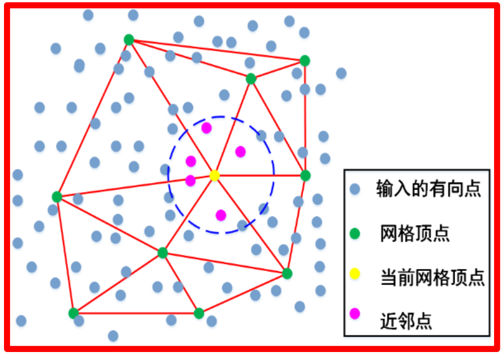
可视信息的获取

1 网格顶点可视信息的计算

求最近邻点可视信息的并集

2 网格面片可视信息的计算

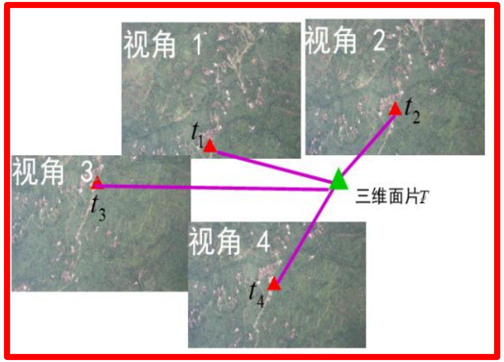
求所有构成顶点可视信息的交集



3 其它网格可视信息的计算

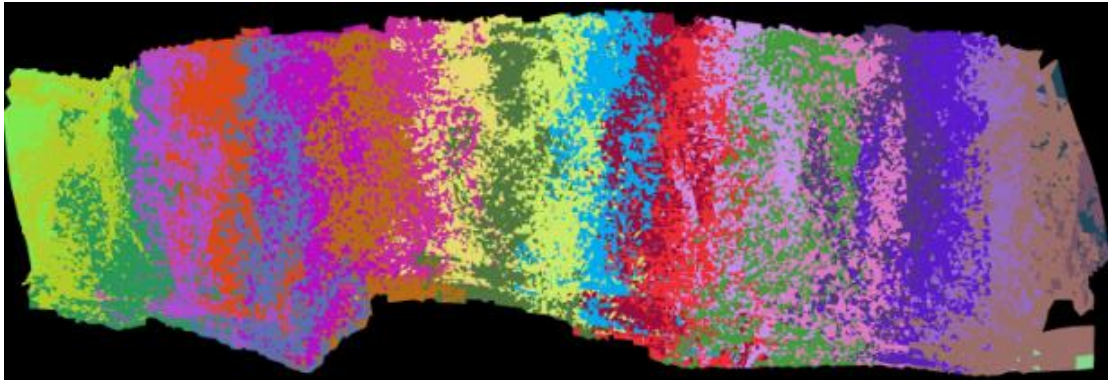
一些面片的可视信息无法通过上述方法求得

通过投影的方式得到这些面片的可视信息



视角选择

不带平滑约束的结果

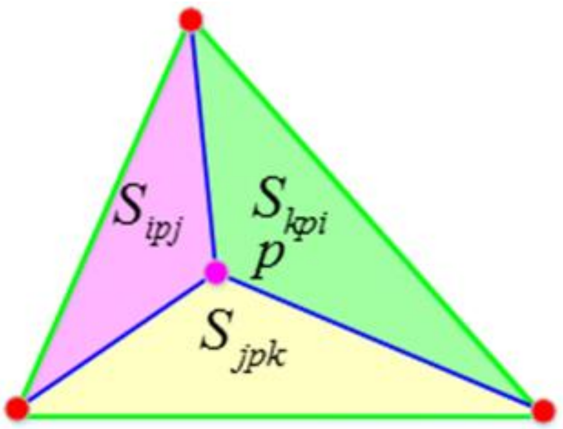


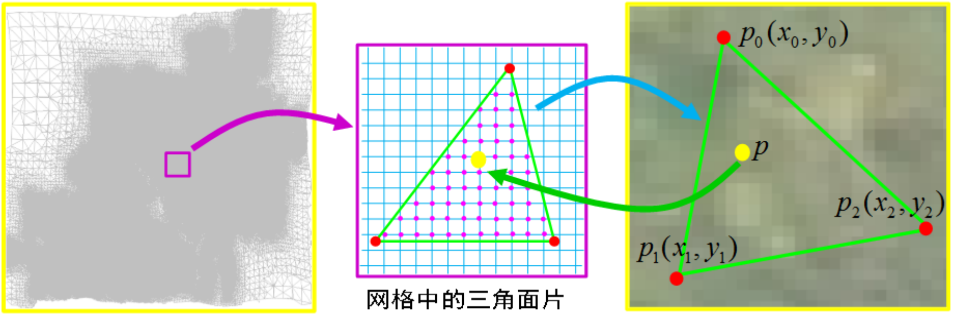
带有平滑约束的结果

纹理图像拼接与编辑

面积坐标-确定投影三角形之间点的对应关系

点的空间坐标 ⟷ 点的面积坐标





需要创建的纹理图像

网格中的三角面片

三角面片在可见视角的投影

点面积坐标

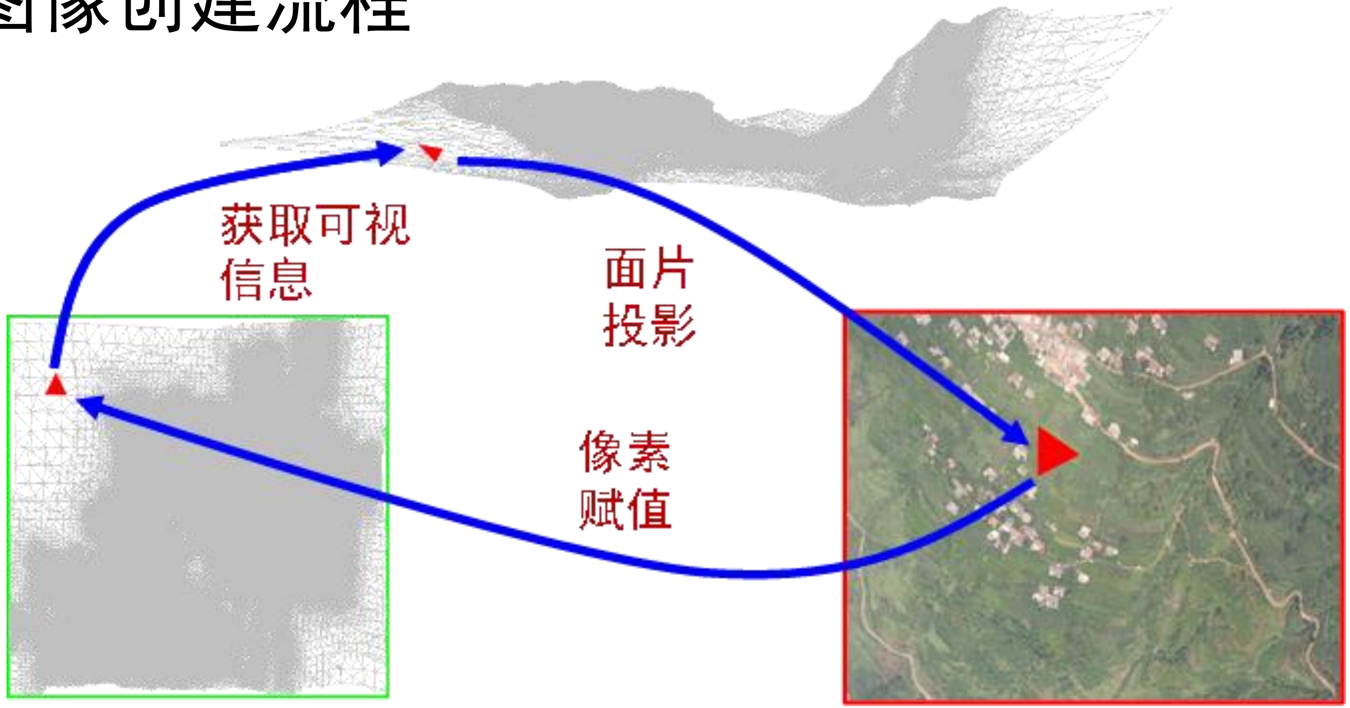
$$A_P = (A_x,\quad A_y,\quad A_z)$$

点像素坐标

$$\begin{cases} u_x = A_x x_0 + A_y x_1 + A_z x_2 \\ u_y = A_x y_0 + A_y y_1 + A_z y_2 \end{cases}$$

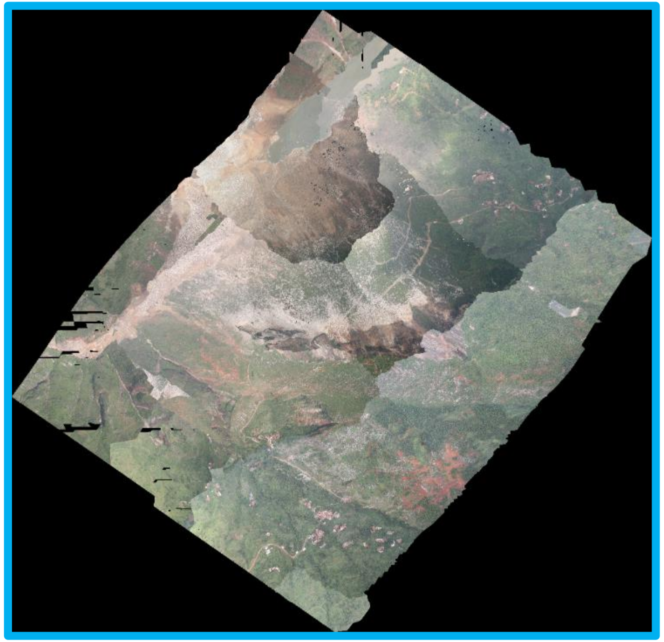
纹理图像拼接与编辑

纹理图像创建流程



纹理图像拼接与编辑

纹理图像从不同的视角拼接而成，不同视角图像的光度变化导致创建的纹理图像存在缝隙

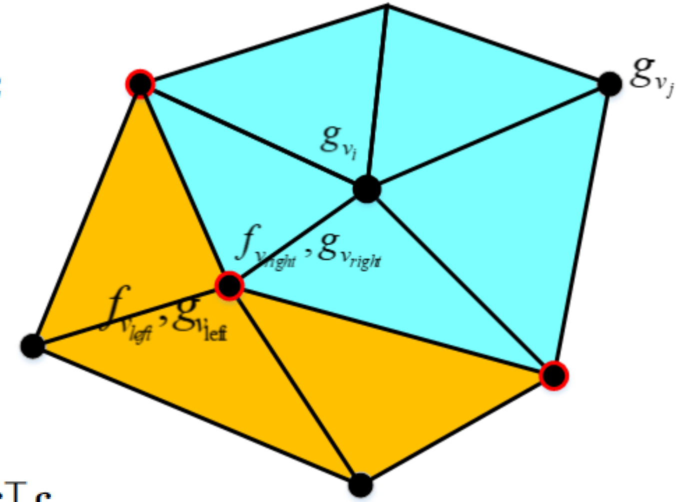


纹理图像拼接与编辑

颜色矫正

每一个顶点计算一个颜色矫正量，为保证一致性，缝隙上的顶点一分为二

$$\underset{\mathbf{g}}{\operatorname{argmin}} \sum_{\substack{v \text{ (split into} \\ v_{\text{left}} \text{ and } v_{\text{right}}) \\ \text{lies on a seam}}} \left(f_{v_{\text{left}}} + g_{v_{\text{left}}} - (f_{v_{\text{right}}} + g_{v_{\text{right}}})\right)^2 + \frac{1}{\lambda} \sum_{\substack{v_i, v_j \text{ are adjacent and in} \\ \text{the same patch}}} \left(g_{v_i} - g_{v_j}\right)^2$$

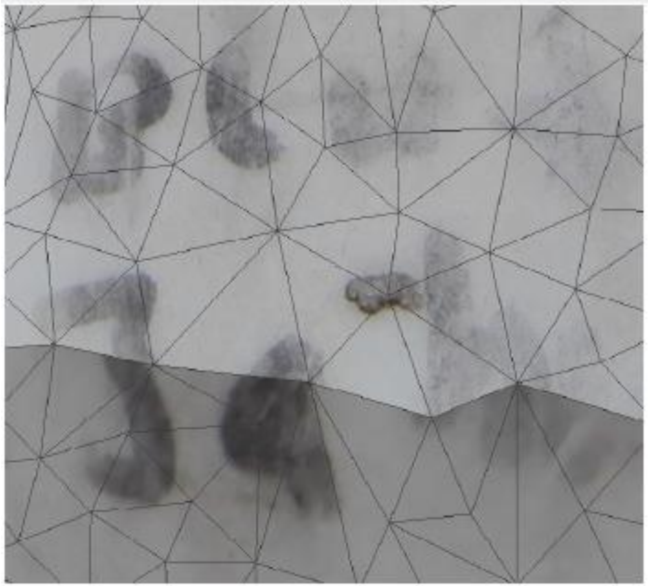


$$\|\mathbf{Ag} - \mathbf{f}\|_2^2 + \|\mathbf{\Gamma g}\|_2^2 = \mathbf{g}^\top(\mathbf{A}^\top\mathbf{A} + \mathbf{\Gamma}^\top\mathbf{\Gamma})\mathbf{g} - 2\mathbf{f}^\top\mathbf{A}\mathbf{g} + \mathbf{f}^\top\mathbf{f}$$

Waechter M, Moehrle N, Goesele M. Let There Be Color! Large-Scale Texturing of 3D Reconstructions[M] Computer Vision – ECCV 2014. Springer International Publishing, 2014:836-850.

纹理图像拼接与编辑

颜色矫正

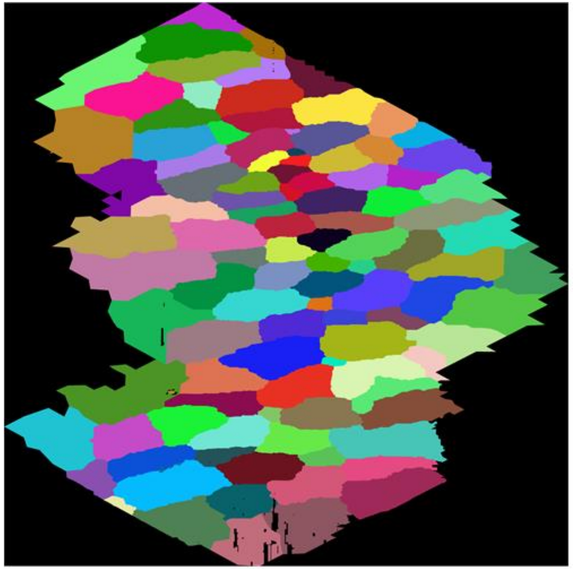


不能完全
去除缝隙

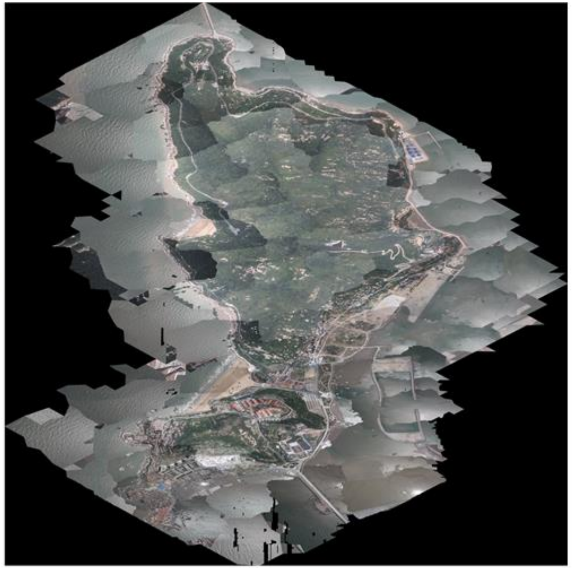
Waechter M, Moehrle N, Goesele M. Let There Be Color! Large-Scale Texturing of 3D Reconstructions[M] Computer Vision – ECCV 2014. Springer International Publishing, 2014:836-850.

纹理图像拼接与编辑

泊松图像编辑



(a) 可视信息优化结果



(b) 创建的原始纹理图像

(c) 泊松图像编辑后的纹理图像

纹理图像拼接与编辑

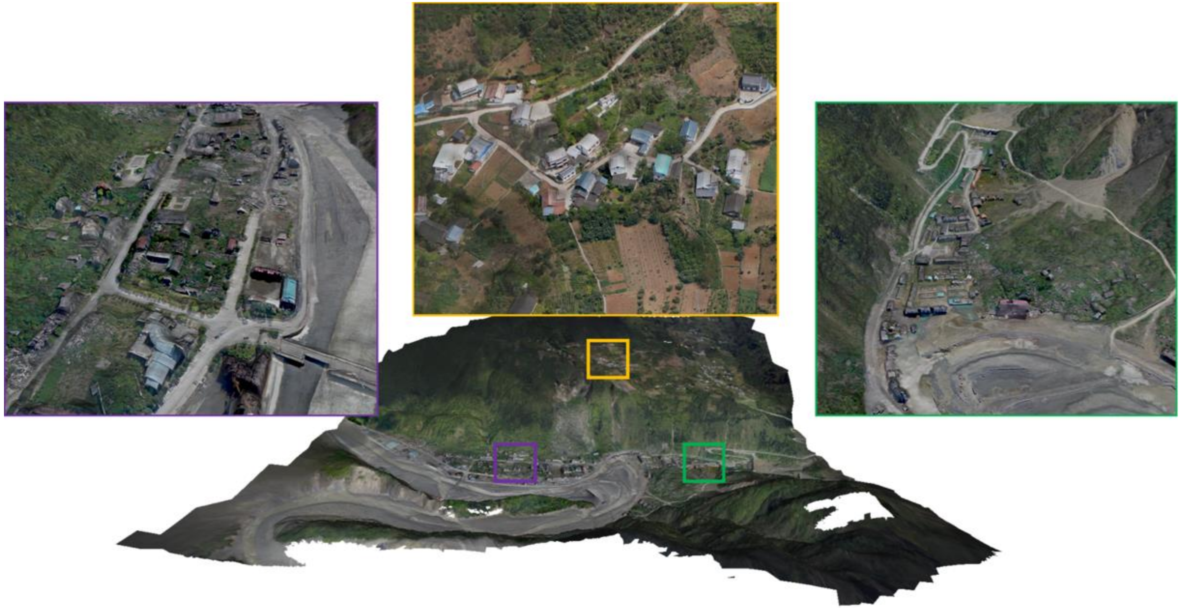
重建结果

倾斜摄影5摄像头影像数据重建结果

纹理图像拼接与编辑

重建结果

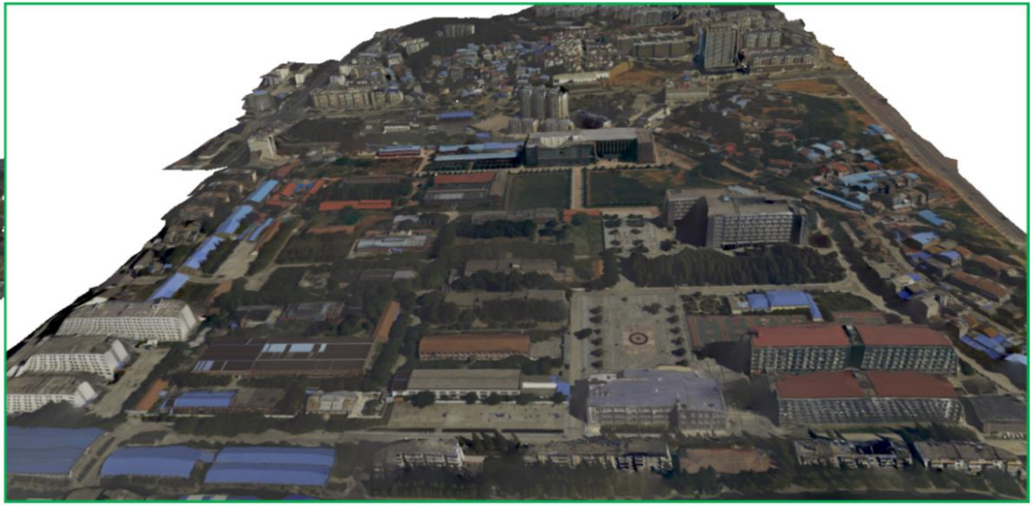
倾斜摄影3摄像头影像数据重建结果



纹理图像拼接与编辑

重建结果

倾斜摄影5摄像头影像数据重建结果



纹理图像拼接与编辑

重建结果

单摄像头影像数据重建结果

深蓝学院
shenlanxueyuan.com

三维建模课程地址

感谢各位聆听！

Thanks for Listening