

# 顾及边缘交融特征的自适应深度图空洞修复算法

王广建, 刘德儿\*

江西理工大学土木与测绘工程学院, 江西 赣州 341000

**摘要** 针对深度图在边缘修复过程中受外部物体深度值的影响,造成深度值修复出现偏差的问题,提出了一种顾及边缘交融特征的自适应深度图空洞修复算法。首先,对深度图和 RGB 图的边缘进行提取、空洞伪边缘去除和边缘融合处理;然后,通过融合的边缘信息和有效像素占比设定滤波窗口大小,并根据滤波窗口与空间距离的关系设定空间距离权重参数,采用深度图与 RGB 图之间的结构相似性最大值作为颜色权重参数;最后,采用中值滤波去除边缘空洞像素和离散的噪声点。在 Middle bury 数据集和 NYU Depth Dataset V2 中对所提算法进行实验,并与其他算法进行对比分析。实验结果表明,所提算法能较好地修复边缘区域的空洞,保持较为清晰的物体边缘轮廓信息,具有较强的鲁棒性。

**关键词** 图像处理; 深度图像; 空洞修复; 联合双边滤波; 边缘提取

中图分类号 TP391.41

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP202259.1810016

## Adaptive Depth Image Hole Repair Algorithm Considering Edge Blending Feature

Wang Guangjian, Liu Deer\*

*School of Civil and Surveying & Mapping Engineering, Jiangxi University of Science and Technology, Ganzhou 341000, Jiangxi, China*

**Abstract** An adaptive depth image hole inpainting algorithm is proposed herein to address the problem of the depth image being affected by the depth value of external objects during the process of edge inpainting. First, the edges of the depth image and RGB image were extracted, then the false edge caused by holes was removed and the edges were fused. The size of the filter window was then determined using the fused edge information and effective pixel ratio. The weight parameters of spatial distance were set on the basis of the relationship between filter window and spatial distance. The maximum structural similarity between the depth image and RGB image was used as the color weight parameter. Finally, a median filter was used to remove edge hole pixels and discrete noise. The proposed algorithm is tested using the Middle bury dataset and NYU Depth Dataset V2 and compared with other algorithms. The results show that the proposed algorithm can repair holes in the edge area more effectively, maintain clearer object edge contour information, and has high robustness.

**Key words** image processing; depth image; hole repair; joint bilateral filter; edge extraction

## 1 引言

近些年来,逐渐热门的消费级深度相机因其成本相对较低、体积小巧轻便、实时感知等特点,在三维重建<sup>[1-3]</sup>、同步定位与建图(SLAM)<sup>[4-5]</sup>、目标检测与跟踪<sup>[6-7]</sup>等领域得到迅速的发展。但由于物体材质、光照条件等因素的影响,深度图在物体边缘或内部出现一定区域的深度值缺失现象,不仅影响深度图的质量,还

影响深度图后期在各领域的应用。

为了解决深度图的深度值缺失问题,近年来国内外许多研究人员进行了大量的相关研究工作。Lei 等<sup>[8]</sup>对深度图边缘进行膨胀,并利用线性插值的方法对相邻背景像素进行空洞插值修复;谭志国等<sup>[9]</sup>对深度图进行分层去噪,并将去噪后的图像重新拼合。Garduño-Ramón 等<sup>[10]</sup>在没有 RGB 图引导修复的前提下,提出了一种基于形态学重建的深度图修复算法。

收稿日期: 2021-06-11; 修回日期: 2021-07-14; 录用日期: 2021-08-25

基金项目: 国家自然科学基金(41361077,41561085)、江西省自然科学基金(20202BAB202025)

通信作者: \*landserver@163.com

上述算法虽能够有效消除范围较小的空洞噪声,但无法有效处理较大区域的黑洞。梁海涛等<sup>[11]</sup>提出了一种基于深度图预处理和图像修复的虚拟视点绘制算法,该算法能够有效提高修复质量,但对于边缘区域的修复不佳,不能很好地保存边缘轮廓细节特征。刘国华等<sup>[12]</sup>通过线性谱聚类超像素分割算法(LSC-D)分割不同类型的空洞并用双边滤波算法进行修复,修复效果较好,但修复效果受限于超像素的分割质量。沈跃等<sup>[13]</sup>利用K-means聚类和近邻回归算法对深度图空洞进行修复,能够较好地修复深度图和保持边缘轮廓性。Lu等<sup>[14]</sup>通过将相似的RGB-D块组成稀疏合成矩阵,然后在低秩子空间约束中捕捉RGB-D块的底层结构,实现深度图的黑洞修复。但上述两种算法的复杂度较高,运行时间较长,不适合于实时修复。杨宜林等<sup>[15]</sup>结合形态学与改进的双边滤波算法较好地修复了较大范围的深度图像,但在复杂场景下的修复效果略显不足。Le等<sup>[16]</sup>在双边滤波的基础上结合RGB图像信息,提出了联合双边滤波(JBF)算法,取得较好的修复效果,但需针对不同空洞图像调整参数,较为繁琐。为解决繁琐的调参问题,王得成等<sup>[17]</sup>提出了自适应联合双边滤波(AJBF)算法,该算法根据空洞大小和结构相似性进行自适应滤波修复,取得较好的修复效果。当空洞区域位于物体边缘处时,受到物体间边缘交融特征的影响,修复值与目标值之间会产生一定的偏差。

为解决AJBF算法在边缘区域修复过程中,受到物体间边缘交融特征影响的问题,在AJBF算法的基础上,结合Canny算法良好的边缘信息提取性质,本文提出了一种顾及边缘交融特征的自适应深度图空洞修复算法。在增加边缘信息的约束下,采用AJBF算法对深度图边缘区域的黑洞进行修复。对修复后图像的定性分析和定量比较表明,所提算法能够较好地保持物体的深度边缘信息。

## 2 基本原理

### 2.1 边缘提取算法

边缘检测的实质是采用某种算法提取图像中目标与背景之间的边界线,通常可以由一阶梯度最大值或二阶导数过零点检测得到图像边缘<sup>[18]</sup>。基于Canny的边缘提取算法是由Canny<sup>[19]</sup>于1986年提出的一种边缘提取算法,具有低错误率、高定位性、最小响应的特点,是目前应用最为广泛的一种经典有效的边缘提取算法。其边缘提取的主要步骤是通过高斯滤波平滑图像,并利用Sobel算子与待提取图像 $I$ 进行卷积计算得到像素间的梯度及梯度向量。每个像素点梯度的幅值 $M$ 和角度值 $\theta_M$ 的表达式为

$$M = |I_p \cdot S_x| + |I_p \cdot S_y|, \quad (1)$$

$$\theta_M = \arctan\left(\frac{I_p \cdot S_x}{I_p \cdot S_y}\right), \quad (2)$$

式中: $I_p$ 代表像素 $p$ 及其邻域像素的值; $S_x$ 、 $S_y$ 分别为 $x$ 、 $y$ 轴方向的Sobel算子,取值分别为 $\{1, 2, 1; 0, 0, 0; -1, -2, -1\}$ 、 $\{1, 0, 1; 2, 0, 2; 1, 0, -1\}$ 。

然后,沿梯度方向进行非极大值抑制,即对像素 $p$ 与沿着其对应的梯度方向的两个邻域像素的幅值 $M$ 进行比较,若像素 $p$ 为最大值,则保留像素 $p$ ,否则将像素 $p$ 的值置为0,从而达到抑制非极大值、保留局部梯度最大的点、得到细化边缘的目的。最后,通过设定高低阈值和滞后技术提取最终边缘,即去除低于低阈值的幅值,保留高于高阈值的像素为边缘像素,对于介于两者之间的幅值,保留仅连接到一个高于高阈值像素的像素作为边缘像素。

### 2.2 自适应联合双边滤波算法

自适应联合双边滤波算法是王得成等<sup>[17]</sup>在联合双边滤波算法的基础上,提出的一种自适应设定滤波参数的深度图空洞修复算法。该算法的主要思想如下:通过计算滤波窗口内有效深度像素占比、像素间欧氏距离结构相似性来确定各个待修复像素的滤波窗口大小、空间距离滤波权重值和颜色相似性权重值等参数,从而达到自适应修复的目的。

对于滤波窗口大小的自适应设置,该算法设定滤波窗口 $m$ 的初始值为3,并根据滤波窗口中有效像素占比 $T$ 与阈值 $Q$ (其中 $Q$ 为0.6)之间的大小关系来确定滤波窗口大小。当 $T < Q$ 时,增大滤波窗口大小为 $m + 2$ ,并进行迭代,直到满足条件 $T \geq Q$ 时,结束迭代,并将迭代后的 $m$ 值作为该空洞像素的最终滤波窗口大小。

对于空间距离权重项参数 $\delta_r$ 的设定,根据空间距离与滤波窗口的大小成反比例的关系,以初始窗口大小与最终窗口大小的比值表示空间距离权重参数,即

$$\delta_r = \frac{m_0}{m} \cdot \delta_{r(\max)}, \quad (3)$$

式中: $m_0$ 为初始滤波窗口大小,且取值为3; $m$ 为最终滤波窗口大小; $\delta_{r(\max)}$ 为 $\delta_r$ 允许最大的权重,其经验值为20。

对于颜色相似性权重项参数 $\delta_c$ ,该算法将结构相似性引入对颜色相似权重项参数的计算,并精简其表达式,删除其常数项。根据同步采集的RGB图像与深度图的结构相似性,确定颜色相似权重项的值,其表达式为

$$S_{\text{sim}}(a, b) = \frac{2\mu_a\mu_b\sigma_{ab}}{(\mu_a^2 + \mu_b^2) \cdot (\sigma_a^2 + \sigma_b^2)}, \quad (4)$$

$$\delta_c = \frac{1}{3} \sum S_{\text{sim}}(R, G, B) \cdot \delta_{c(\max)}, \quad (5)$$

式中: $\mu_a$ 、 $\mu_b$ 分别为图像 $x$ 、 $y$ 的像素均值; $\sigma_a$ 、 $\sigma_b$ 、 $\sigma_{ab}$ 分别为图像 $a$ 、 $b$ 的标准差及两者的协方差; $\delta_{c(\max)}$ 为 $\delta_c$ 允许的最大值,且其值设为20。

将上述所得的参数值代入联合双边滤波算法公式

中,即

$$D_{\text{ibf}} = \frac{\sum_{i,j \in \Omega} \omega_c(i,j) \cdot \omega_r(i,j) \cdot D}{\sum_{i,j \in \Omega} \omega_c(i,j) \cdot \omega_r(i,j)}, \quad (6)$$

$$\omega_c(i,j) = \exp\left(-\frac{|C_j - C_i|^2}{2\delta_c^2}\right), \quad (7)$$

$$\omega_r(i,j) = \exp\left(-\frac{|R_j - R_i|^2}{2\delta_r^2}\right), \quad (8)$$

式中:  $D_{\text{ibf}}$  为经滤波后的深度值;  $\omega_c(i,j)$  深度图像的像素  $i$  及其邻域像素  $j$  与 RGB 图对应位置像素间的颜色相似项权重;  $\omega_r(i,j)$  为像素  $i$  与其邻域  $j$  的欧氏距离项权重;  $D$  为滤波窗口内的原始深度值矩阵;  $C_i$ 、 $C_j$  分别为 RGB 图像素  $i$  与其邻域  $j$  的颜色值;  $R_i$ 、 $R_j$  分别为 RGB 图像素  $i$  及其邻域  $j$  的欧氏距离值。

自适应联合双边滤波算法能够针对不同大小的空洞区域进行自适应修复,并取得较好的修复效果,但其在修复边缘交融区域空洞时,尤其是深度值差异较大的复杂区域,由于其他物体深度值的影响,修复结果往往与目标值存在一定的偏差。

### 2.3 顾及边缘交融特征的自适应深度图空洞修复算法

为了解决上述边缘交融区域的修复问题,在 AJBF 算法的基础上,融合深度图和 RGB 图的边缘信息进行算法改进,从而能够更加准确地修复边缘交融区域空洞像素。所提算法主要包括边缘信息提取与融合和自适应深度图空洞修复算法两部分。

#### 2.3.1 边缘信息提取与融合

在进行边缘信息的提取过程中,若直接使用 Canny 算法提取的 RGB 图边缘,则易受物体表面图案颜色的影响,导致提取出的边缘中包含物体表面图案纹理形成的“伪边缘”,并不是物体实际意义上的边缘;若直接使用 Canny 算法提取的深度图边缘,则在得到

物体的真实边缘信息的同时,又往往因为空洞像素与邻域有效深度像素间存在的较大梯度差,提取的边缘信息中含有因空洞区域造成的“伪边缘”。因此,在分别提取深度图和 RGB 图的边缘信息的基础上,去除空洞伪边缘信息,将两种图像边缘信息进行融合。边缘提取算法步骤具体如下,图 1 为其流程图。

1) 深度图边缘提取。采用 Canny 算子边缘提取算法对深度图  $D_1$  进行边缘信息提取,得到深度图边缘  $D_{\text{bd}}^0$ 。

2) 去除空洞伪边缘。对于由空洞产生的伪边缘,通过遍历空洞邻域范围的像素对伪边缘像素进行去除,得到去除空洞伪边缘的深度图边缘  $D_{\text{bd}}^1$ 。

3) RGB 图像边缘提取。采用 Canny 算子边缘提取算法提取与深度图同步采集并配准的 RGB 图  $C_1$  的边缘信息,得到 RGB 图边缘  $C_{\text{bd}}$ 。

4) 深度图与 RGB 图的边缘融合。由于在步骤 2) 的空洞伪边缘去除过程中,可能将真实的边缘去除,同时,RGB 边缘与深度边缘存在部分区域不重合的现象;为此,搜索空洞区域像素并检查空洞像素及其邻域范围内是否存在 RGB 图边缘  $C_{\text{bd}}$  中的边缘像素,若存在,则将对应的深度图边缘像素  $D_{\text{bd}}^1$  中对应位置的像素设为边缘像素,检查填充的边缘像素与深度图边缘像素  $D_{\text{bd}}^1$  间边缘的趋势线是否重合,对于趋势线不重合的部分,通过调整填充的边缘线整体的相对位置使其边缘线与深度图边缘像素  $D_{\text{bd}}^1$  的边缘线重合,得到了融合后的深度图边缘  $D_{\text{bd}}^2$ 。

5) 检查深度图边缘  $D_{\text{bd}}^2$  边缘线段的连通性。沿着边缘线段方向,搜索端点的邻域像素,若在其邻域像素的一定范围内存在另一条边缘线段的端点像素,则根据边缘趋势线方向将路径上的像素点置为边缘像素。同时,对于提取的边缘图中存在的离散分布的边缘像素噪声点进行去除,得到最终的深度图边缘  $D_{\text{bd}}^3$ 。

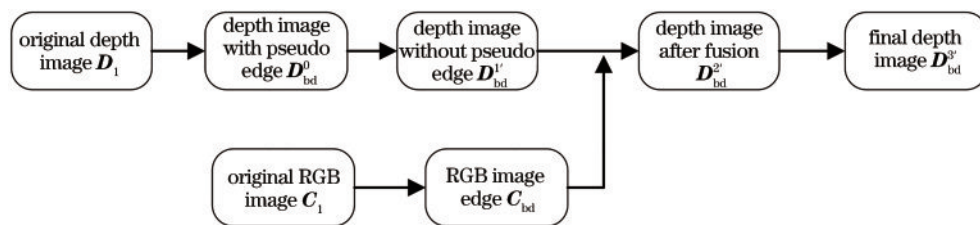


图 1 边缘提取流程图

Fig. 1 Flow chart of edge extraction

#### 2.3.2 自适应深度图空洞修复算法

以深度图边缘  $D_{\text{bd}}^3$  为基础,对 AJBF 算法的滤波窗口权重值和滤波参数的计算进行了一定的改进,并结合中值滤波算法对深度缺失的边缘像素进行修复。具体措施如下:

1) 改进滤波窗口中权重值的计算。在空洞修复

过程中,滤波窗口中往往存在一些深度值缺失的空洞像素。在权重值计算时,如果空洞像素占有一定的滤波权重,则修复后的深度值将整体偏低,并且会误差传播,影响其邻域像素后续的修复结果。当待修复像素位于物体边缘附近时,滤波窗口往往存在其他物体的深度值,而不同物体间的深度值不存在相关性,若其占

有权重, 则其修复值将与目标值产生偏差, 如图 2 所示。

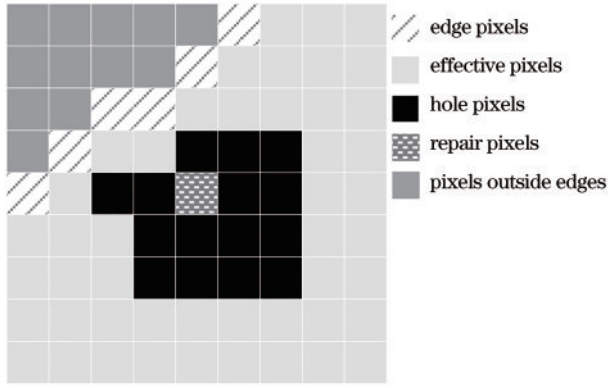


图 2 滤波窗口示意图

Fig. 2 Schematic diagram of filter window

为了解决这个问题, 将上述提取的深度图边缘  $D_{\text{hd}}^3$  加入滤波窗口中各像素的权重值计算中, 并判断滤波窗口内是否含有边缘像素, 若存在边缘像素, 则由待修复像素点出发, 采用四邻域区域生长算法对滤波窗口进行搜索。对于未搜索到的像素, 将其权重值置为零。同时, 对于搜索到的像素中, 深度图对应位置为空洞像素的权重值也置为零, 以此消除空洞像素和边缘外其他物体深度值对修复结果的影响。对于空洞较大的区域, 由于其空洞缺失区域较大, 其邻域有效像素的距离权重值相对较小, 修复后的深度值可信度偏低。因此, 经多次实验, 将滤波窗口允许的最大值设为 100。

2) 改进滤波参数允许最大值的设定。在相同条件下, 不同深度相机采集的深度图像分辨率不同, 相同的空洞所占图像的像素数量也不同, 若采用统一的允许最大值, 则不同尺寸的深度图的修复质量也将存在差异。为此, 根据高斯分布中标准差越大, 权重值越平缓的特点, 并基于文献[17]经验值的设定, 建立滤波参数允许最大值  $\delta'_{c(\max)}$  与图像高  $h$  之间的关系:

$$\delta'_{r(\max)} = \frac{h}{h_0} \cdot \delta_{r(\max)}, \quad (9)$$

$$\delta'_{c(\max)} = \frac{h}{h_0} \cdot \delta_{c(\max)}, \quad (10)$$

式中:  $\delta_{c(\max)}$ 、 $\delta_{r(\max)}$  为文献[17]的空间距离权重项参数和颜色相似性权重项参数经验值, 且为 20;  $h_0$  为设定的初始深度图像的高度, 其值设为 370。

3) 改进滤波窗口中颜色权重参数的计算。深度图与 RGB 图三个图层的结构相似性越高, 则其代表的颜色权重值越高, 引导修复的结果也越接近真实值, 但 RGB 图不同图层与深度图的结构相似性的值不同。为了提高修复的效果, 分别计算 RGB 图三个图层与深度图之间的结构相似性, 并取三者的最大值作为颜色相似性权重参数, 与对应颜色图层的颜色值进行计算, 然后将计算结果作为颜色相似性权重。

$$\delta_{c,n} = \max[S_{\text{ssim}}(r, d), S_{\text{ssim}}(g, d), S_{\text{ssim}}(b, d)] \cdot \delta'_{c(\max)}, \quad (11)$$

$$\omega_c(i, j) = \exp\left(-\frac{|C_{j,n} - C_{i,n}|}{2\delta_{c,n}^2}\right), \quad (12)$$

式中:  $\delta_{c,n}$  指 RGB 图的图层  $n$  对应的颜色相似性权重参数值, 其中  $n \in \{r, g, b\}$ ;  $C_{i,n}$ 、 $C_{j,n}$  分别表示待修复点像素  $i$  及其邻域范围内有效像素  $j$  对应的 RGB 图的图层  $n$  的颜色值。

4) 当待修复像素为边缘像素, 则无法通过四邻域区域生长算法判断其有效像素区间, 滤波后的深度图中存在未被修复的边缘像素和离散的空洞噪声点。为此, 采用滤波窗口大小为  $5 \times 5$  的中值滤波算法对未修复的空洞像素进行修复。

### 3 分析与讨论

实验采用 Middle-bury 标准数据集<sup>[20]</sup> 和 NYU Depth Dataset V2 数据集<sup>[21]</sup> 中的部分场景图像作为实验数据。为了便于后续的分析 and 比较, 将 art、dolls、moebius 场景下的深度图部分边缘区域深度值置零。而 NYU Depth Dataset V2 数据集中的深度图空洞是在自然环境中采集产生的, 可以定性反应出各算法修复的优劣。实验在 Windows 10 系统、i5-9300H CPU 和 matlab 2018b 软件环境下进行, 并将所提算法的修复结果分别与文献[10]的基于形态学重建(MF)的算法和 AJBF 算法的修复结果进行了定性分析和定量比较, 以验证所提算法的可靠性和有效性, 实验结果如图 3 和图 4 所示。

#### 3.1 定性分析

从[图 3(b)、图 4(b)]可以看出, 上述算法均能较好地修复一些小范围的空洞, 但对于较大的空洞, 不同算法的修复效果不同。MF 算法虽能一定程度修复深度图, 但图像存在明显的修复痕迹, 同时, 边缘轮廓信息缺失较为严重, 如[图 5(b)]所示。与 MF 算法相比, AJBF 算法修复效果有了显著性的提升, 整体修复效果接近目标图像, 但在修复范围较大的边缘交融区域时, 边缘存在一定程度的模糊, 如[图 5(c)]的 A 和 E 所示, 其修复后的深度像素与邻域深度像素存在较明显的色差, 不能较好地保留边缘信息。所提算法则能够较好地修复边缘交融区域, 并且在细节上没有明显的色差现象, 如[图 5(d)]所示, 修复后的深度图边缘交融区域没有明显的色差和噪声点, 同时, 修复后的深度图多个局部细节, 边缘纹理清晰, 能够保留深度图边缘轮廓信息。

#### 3.2 定量比较

为了量化比较修复结果, 引入峰值信噪比(PNSR)和均方根误差(RMSE)两种评价指标对实验结果进行对比分析。PSNR 的值越大, 代表修复后的图像与目标图像的接近程度越高; 而 RMSE 值则代表

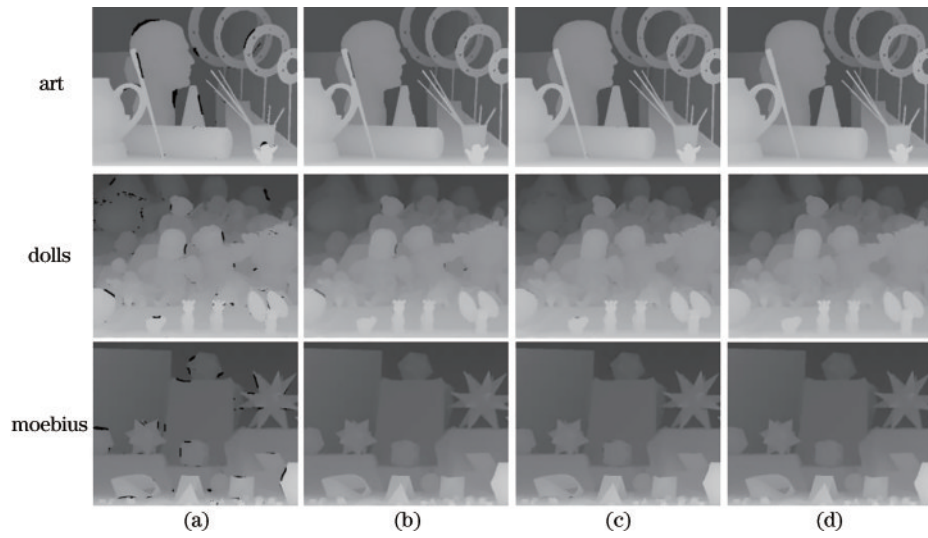


图 3 人工添加空洞修复结果。(a)空洞图像;(b)MF算法的修复结果;(c)AJBF算法的修复结果;(d)所提算法的修复结果  
 Fig. 3 Repair results of artificially added holes. (a) Hole images; (b) repair results of MF algorithm; (c) repair results of AJBF algorithm; (d) repair results of proposed algorithm

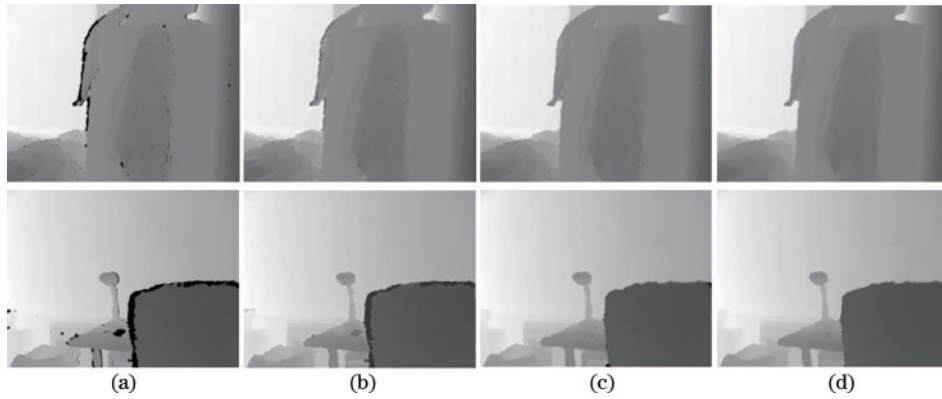


图 4 自然空洞修复结果。(a)空洞图像;(b)MF算法的修复结果;(c)AJBF算法的修复结果;(d)所提算法的修复结果  
 Fig. 4 Repair results of natural holes. (a) Hole images; (b) repair results of MF algorithm; (c) repair results of AJBF algorithm; (d) repair results of proposed algorithm

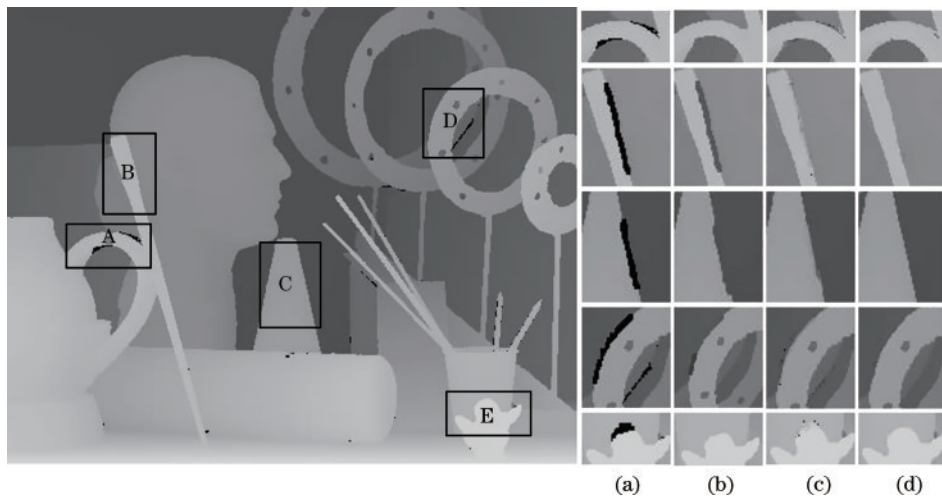


图 5 修复结果细节对比图。(a)原始图像的局部细节;(b)MF算法修复的局部细节;(c)AJBF算法修复的局部细节;(d)所提算法修复的局部细节  
 Fig. 5 Comparison of repair results. (a) Local details of original images; (b) local details of MF algorithm; (c) local details of AJBF algorithm; (d) local details of proposed algorithm

修复后的图像与目标图像间的误差大小,两者成反比。为了保证评价的准确性和客观性,分别提取原始深度图中深度值置零的区域与各算法修复的对应区域进行比较和分析,具体结果如表 1 所示。

表 1 三种算法量化指标对比表  
Table 1 Comparison table of quantitative indicators of three algorithms

Algorithm	Scene	MF	AJBF	Proposed algorithm
PNSR	Art	14.09	20.41	21.70
	Dolls	14.64	17.40	25.58
	Moebius	18.91	22.47	26.52
RMSE	Art	50.33	24.32	20.96
	Dolls	47.26	34.39	13.41
	Moebius	28.92	20.38	10.55

从表 1 可以看出,与对比的 MF 和 AJBF 两种算法相比,所提算法修复效果最佳且准确率最高,所提算法的评价指标明显优于改进前的 AJBF 算法。与对比的算法相比,以 Dolls 场景为例,所提算法的 PNSR 值分别提高了 10.94 dB, 8.18 dB, RMSE 值分别降低了 33.85, 20.98。所提算法的 PNSR 值较 AJBF 算法平均提高 23.79%, RMSE 值平均降低了 41.02%。这表明所提算法对边缘交融区域场景下的空洞修复有较强的鲁棒性。

## 4 结 论

在 AJBF 算法的基础上,提出一种顾及边缘交融特征的自适应深度图空洞修复算法。通过结合深度图和 RGB 图的边缘信息,将边缘信息加入滤波窗口的权重判定中,并取深度图和 RGB 图的相似性最高的值作为颜色权重参数,根据深度图分辨率来设定滤波参数的最大值,最后采用中值滤波进行进一步修复。在 Middle-bury 数据集和 NYU Depth Dataset V2 数据集中分别与 MF 算法、JBF 算法进行对比。相较于 MF 算法和 AJBF 算法,所提算法修复的图像能较好地保持物体边缘,图像质量接近目标图像;所提算法的各项分析指标较 MF 算法和 AJBF 算法有了较大的提升。这表明所提算法有较强的鲁棒性和较高的修复准确性,能较好地修复边缘交融区域的空洞。但该算法也存在一些不足,由于算法加入了边缘提取的步骤,较原有算法增加了运行时间。同时,边缘提取结果也受 RGB 图像质量的影响,在某些边缘处于阴影或是光照强烈的区域提取效果不佳。在后续的工作中,将在完善算法结构、提高 RGB 图像边缘提取质量等方面进行研究和改进。

## 参 考 文 献

- [1] 徐国权, 张一帆, 万建伟, 等. 高分辨率三维成像激光雷达的应用[J]. 光学学报, 2021, 41(16): 1628002.  
Xu G Q, Zhang Y F, Wan J W, et al. Application of

High-Resolution Three-Dimensional Imaging Lidar[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(16): 1628002.

- [2] 费点, 陈建林, 刘东生, 等. 基于深度相机的特殊表面定位与修复[J]. 光学学报, 2020, 40(21): 2115002.  
Fei D, Chen J L, Liu D S, et al. Depth Camera-Based Location and Restoration of Special Surface[J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(21): 2115002.
- [3] Teng C H, Chuo K Y, Hsieh C Y. Reconstructing three-dimensional models of objects using a Kinect sensor[J]. The Visual Computer, 2018, 34(11): 1507-1523.
- [4] Naudet-Collette S, Melbouci K, Gay-Bellile V, et al. Constrained RGBD-SLAM[J]. Robotica, 2021, 39(2): 277-290.
- [5] 晏小彬, 彭道刚, 威尔江. 基于地平面的单目视觉辅助激光雷达 SLAM 研究[J]. 光学学报, 2020, 40(24): 2428002.  
Yan X B, Peng D G, Qi E J. Research on Ground-Plane-Based Monocular Aided LiDAR SLAM[J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(24): 2428002.
- [6] 孙典奇, 段慧仙, 裴浩东, 等. 基于 TOF 相机的空间非合作目标位姿测量方法[J]. 光学学报, 2021, 41(22): 2212003.  
Sun D Q, Duan H X, Pei H D, et al. Pose Measurement Method of Space Non-Cooperative Targets Based on TOF Camera[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(22): 2212003.
- [7] Yu N B, Wang S R. Enhanced autonomous exploration and mapping of an unknown environment with the fusion of dual RGB-D sensors[J]. Engineering, 2019, 5(1): 164-172.
- [8] Lei J J, Zhang C C, Wu M, et al. A divide-and-conquer hole-filling method for handling disocclusion in single-view rendering[J]. Multimedia Tools and Applications, 2017, 76(6): 7661-7676.
- [9] 谭志国, 欧建平, 张军, 等. 一种层析深度图像去噪算法[J]. 光学学报, 2017, 37(5): 0510002.  
Tan Z G, Ou J P, Zhang J, et al. A laminar denoising algorithm for depth image[J]. Acta Optica Sinica, 2017, 37(5): 0510002.
- [10] Garduño-Ramón M A, Terol-Villalobos I R, Osornio-Rios R A, et al. A new method for inpainting of depth maps from time-of-flight sensors based on a modified closing by reconstruction algorithm[J]. Journal of Visual Communication and Image Representation, 2017, 47: 36-47.
- [11] 梁海涛, 陈晓冬, 徐怀远, 等. 基于深度图预处理和图像修复的虚拟视点绘制[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2019, 31(8): 1278-1285.  
Liang H T, Chen X D, Xu H Y, et al. Virtual view rendering based on depth map preprocessing and image inpainting[J]. Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics, 2019, 31(8): 1278-1285.
- [12] 刘国华, 段建春. 基于 Kinect 相机的深度图像空洞修复及超像素分割算法[J]. 计算机工程与科学, 2020, 42(5): 851-858.  
Liu G H, Duan J C. A deep image hole repairing method and a superpixel segmentation algorithm based on Kinect

- camera[J]. *Computer Engineering & Science*, 2020, 42(5): 851-858.
- [13] 沈跃, 徐慧, 刘慧, 等. 基于 K-means 和近邻回归算法的 Kinect 植株深度图像修复[J]. *农业工程学报*, 2016, 32(19): 188-194.  
Shen Y, Xu H, Liu H, et al. Kinect scanning plant depth image restoration based on K-means and K-nearest neighbor algorithms[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2016, 32(19): 188-194.
- [14] Lu S, Ren X F, Liu F. Depth enhancement via low-rank matrix completion[C]//2014 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, June 23-28, 2014, Columbus, OH, USA. New York: IEEE Press, 2014: 3390-3397.
- [15] 杨宜林, 李积英, 王燕, 等. 基于改进双边滤波的深度图像修复算法研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2020, 57(16): 161020.  
Yang Y L, Li J Y, Wang Y, et al. Research on depth image repair algorithm based on improved bilateral filter [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2020, 57(16): 161020.
- [16] Le A V, Jung S W, Won C S. Directional joint bilateral filter for depth images[J]. *Sensors*, 2014, 14(7): 11362-11378.
- [17] 王得成, 陈向宁, 易辉, 等. 基于自适应联合双边滤波的深度图像空洞填充与优化算法[J]. *中国激光*, 2019, 46(10): 1009002.  
Wang D C, Chen X N, Yi H, et al. Hole filling and optimization algorithm for depth images based on adaptive joint bilateral filtering[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2019, 46(10): 1009002.
- [18] 许宏科, 秦严严, 陈会茹. 一种基于改进 Canny 的边缘检测算法[J]. *红外技术*, 2014, 36(3): 210-214.  
Xu H K, Qin Y Y, Chen H R. An improved algorithm for edge detection based on Canny[J]. *Infrared Technology*, 2014, 36(3): 210-214.
- [19] Canny J. A computational approach to edge detection[J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1986, 8(6): 679-698.
- [20] Scharstein D, Pal C. Learning conditional random fields for stereo[C]//2007 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, June 17-22, 2007, Minneapolis, MN, USA. New York: IEEE Press, 2007: 9738080.
- [21] Silberman N, Hoiem D, Kohli P, et al. Indoor segmentation and support inference from RGBD images [M]//Fitzgibbon A, Lazebnik S, Perona P, et al. *Computer vision-ECCV 2012. Lecture notes in computer science*. Heidelberg: Springer, 2012, 7576: 746-760.