

## 递进填充线算法对 DIBR 虚拟图像的修复

王双梅

(四川师范大学基础教学学院 成都 610066)  
(shinemewang@163.com)

**摘要:** 在基于深度图的虚拟图像绘制(DIBR)中,前景物体的遮挡会造成虚拟图像中的空洞问题.针对 Criminisi 算法及模板匹配对空洞边界噪声敏感的问题,提出一种基于递进填充线的填补算法.首先根据视点变换的方向将空洞的背景部分边界扩大,以消除深度误差造成的空洞边界上的残余前景噪声;在空洞填充的遍历过程中,采用提出的递进填充线算法对每次更新后的剩余空洞提取基于视点方向的部分边界作为填充线,以限制被填充块的搜索范围,使被填充空洞块的择优顺序以背景纹理优先,避免了空洞边界上前景纹理的误填充.实验结果表明,该算法峰值信噪比比 Criminisi 算法平均高出 1.6173,比基于深度的模板匹配算法平均高出 1.3105,能更有效地抑制 DIBR 空洞纹理的错误生长,修复图像质量.

**关键词:** 基于深度图的图像绘制;虚拟图像;空洞填充;图像修复

**中图分类号:** TP391.41

## Recursive Line-based Algorithm for Hole-filling in DIBR Images

Wang Shuangmei

(College of Fundamental Education, Sichuan Normal University, Chengdu 610066)

**Abstract:** Depth-image-based rendering (DIBR) is an image synthesis method for rendering virtual free view-point images from depth images. However, virtual images generated by DIBR usually contain holes, which are spatial regions occluded by foreground objects. Many methods have been proposed to eliminate these holes. Criminisi and template matching are two of them. In this paper, a new hole-filling algorithm based on recursive-line is proposed to reduce the mismatches caused by the noise around contours of holes in Criminisi and template matching. First, according to the direction of view-switch, contours of holes in background area are widened to reduce the foreground noise from location deviation of depth image and view image. Second, in the ergodic hole-filling process, contours of holes in background area are extracted as filling lines. Only patches on filling lines can be filled, which reduces the number of candidate patches as well as gives high priority to background patches. Experimental results show the proposed algorithm gives higher PSNR than Criminisi algorithm by 1.6173, and higher PSNR than depth-based template matching by 1.3105. Proposed algorithm is capable of effectively reducing the errors in hole-filling and improving image quality.

**Key words:** depth-image-based rendering (DIBR); virtual image; hole-filling; image inpainting

基于深度图的绘制技术(depth-image-based rendering, DIBR)<sup>[1]</sup>是一种虚拟视点变换技术,其

基本思想是根据采集的深度信息将已知的视点图像映射到三维空间,再从三维空间投影到一个自由

收稿日期: 2016-07-29; 修回日期: 2017-02-07. 基金项目: 四川省教育厅项目(15ZB0043). 王双梅(1980—),女,硕士,讲师,主要研究方向为虚拟场景构建、图像处理.

角度的虚拟视点平面上,生成对应的虚拟视点图像。DIBR 不仅绘制速度快,生成的虚拟图像真实感强,而且可绘制任意视点的图像,是目前虚拟现实中最有发展前景的技术<sup>[2-3]</sup>。但由于场景中的遮挡因素,在基于 DIBR 技术的虚拟图像生成过程中,当被遮挡的物体被切换到新的虚拟视点变为可见时,会产生“空洞”问题<sup>[3]</sup>。目前,解决空洞的方法主要有 2 类: 1) 对深度图进行预处理。使用滤波器对深度信号作平滑处理,以减小深度的不连续性,如常用的均值滤波器、中值滤波器等。Lu 等<sup>[4]</sup>采用分段平滑滤波器,在前台区域不变的情况下对深度图的背景区域进行滤波,以获得较好的主观质量的虚拟视图。余思文等<sup>[5]</sup>提出深度自适应的方法,对深度视频中的边缘部分进行自适应重建。Chen 等<sup>[6]</sup>对深度图进行层次过滤,以快速减少空洞。但是,对深度图预处理只能减少细小空洞的产生,对较大的空洞填补效果不理想。2) 对已产生的空洞进行填补。主要的技术分为 2 类: a. 基于图像插值的修复技术。刘占伟等<sup>[7]</sup>对图像的遮挡部位利用图像融合技术修复较大的空洞,利用图像插值技术填充较小的空洞。Paradiso 等<sup>[8]</sup>将像素表示为扭曲的有限长度,并由此作线性插值填补空洞和减少执行时间。但是,插值技术适合于修复细小的裂缝,对较大的空洞填补效果不理想。b. 基于纹理块搜索和匹配技术,也是目前广泛采用的空洞修复技术。Criminisi 等<sup>[9]</sup>根据空洞边界上的等照度线的强弱和方向来构建优先级函数以决定图像修复顺序,以保持图像纹理和结构信息的完整性和连贯性,但对空洞边界上的噪声敏感。骆凯等<sup>[3]</sup>在深度约束下进行纹理搜索和模板匹配,设定颜色差与深度差的权值分配来构建一种匹配函数,以抑制较小的空洞边界噪声引起的纹理错生长。Reel 等<sup>[10]</sup>根据不同深度阈值范围将纹理图和深度图进行多尺度分块,再根据不同的深度范围进行模板匹配。但由于深度图在采集时受到强反光等因素的影响,使得基于深度约束的模板匹配不够精确。

经实验发现, Criminisi 算法对空洞边界上的纹理敏感,在空洞边界上包含 2 种干扰信息: 一是在采集的深度图与原视点图之间的细小错位,使得 DIBR 三维变换后空洞边界上具有残余前景噪声; 二是空洞附近前景物体纹理的干扰。由于被遮挡的是背景纹理,因此理想的修复应该是以背景纹理来填充空洞; 但由于空洞的边界上既包含了背

景纹理也包含前景纹理,同时 Criminisi 算法是对空洞全部边界由外至内的逐层修复,因此前景纹理会被错误地填充到空洞内。另外,前景纹理干扰被填充块的择优顺序,即使加入深度约束条件进行匹配,尤其对于较大的空洞的填充,其匹配精度也会不理想。

为解决以上问题,本文提出一种递进填充线算法。首先将虚拟图像中空洞的背景一侧边界扩大,以消除错位造成的空洞边界上的残余前景噪声; 其次在空洞填充的遍历过程中对每次填充更新后的空洞边界做单侧提取,作为剩余空洞的填充线,使得被填充空洞块的择优顺序以背景纹理优先,将原来基于空洞整体边界向中心填充的方向变为沿空洞一侧的单向填充; 最后当虚拟图像中不再有空洞像素时,填充完毕。本文算法没有根据深度值来判断前景、背景,而是根据视点变换方向进行判断,能有效地避免深度阈值的选取以及误匹配后的深度值进一步影响后续的空洞填充。实验结果表明,与同类算法相比,本文算法能有效地抑制空洞纹理的错误生长,峰值信噪比比 Criminisi 算法平均高出 1.6173,比基于深度的模板匹配算法平均高出 1.3105。

## 1 前期工作

前期工作包括两部分:

1) 对原始图像进行 DIBR 三维变换产生虚拟视点图像。图 1 所示为视点向左移动后生成的虚拟图像,由于前景人物的遮挡,背景区域产生了空洞。

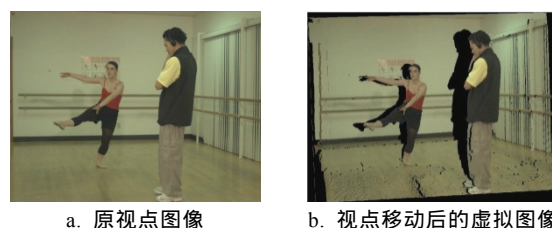


图 1 空洞的产生

2) 对虚拟图像消除噪声,包括深度图噪声和空洞边界上的残余前景噪声。对于深度图噪声,本文采用中值滤波对深度图中深度值不连续的区域进行平滑处理。由于残余前景噪声处于虚拟图像的空洞边界上,因此采用扩大空洞的方法来消除该噪声。首先根据虚拟视点的移动方向(即空间位移、旋转矩阵)来判断残余前景噪声的方位; 然后

提取该侧的空洞边界点, 将其 RGB 值赋为 0, 即将该侧边界像素变为空洞像素, 达到消除残余前景噪声的效果.

## 2 空洞的填充

本文算法的目标是将被遮挡的背景纹理优先填充到空洞中. 首先对每次填充更新后的空洞提取背景一侧的边界作为剩余空洞的填充线; 然后以填充线为搜索范围, 寻找最优空洞块进行填充. 算法步骤如下:

输入. 含空洞的虚拟图像矩阵  $A$ , 原视点平移、旋转参数矩阵  $[R, t]_0$ , 虚拟视点平移、旋转参数矩阵  $[R, t]_v$ .

输出. 填充后的虚拟图像矩阵  $B$ .

Step1. 提取新空洞的填充线.

Step1.1. 利用 Laplacian 算子提取空洞的全边界.

Step1.2. 在空洞的全边界中提取填充线.

Step2. 遍历填充线寻找最优被修复块.

Step2.1. 以填充线一点  $p$  为中心, 取  $n \times n$  大小的纹理块(含空洞)  $\Psi_p$  作为被修复块, 如图 2a 所示.

Step2.2. 遍历整个填充线, 计算填充线上的每个被修复块的优先权, 通过比较优先级大小确定最优修复块.

Step3. 遍历非空洞区域寻找最佳匹配块. 在非空洞区域中, 设定  $n \times n$  大小的滑动块进行滑动遍历, 计算  $n \times n$  的滑动块和被修复块中对应像素点的 RGB 平方差之和, 选取计算结果最小的滑动块作为最佳匹配块.

Step4. 将最佳匹配块的非空像素复制到待修复块的空洞像素中, 更新空洞.

Step5. 重复 Step1~Step4, 直到整个空洞区域被填充完毕.

Step1.2 的说明如下:

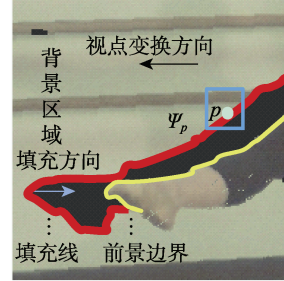
如图 2a 所示, 视点变换方向为左, 形成的空洞位于前景物的左侧. 填充线是空洞邻近背景区域的边界, 即空洞的左侧边界, 空洞的右侧边界则属于前景区域.

根据视点位移方向在空洞全边界中提取填充线. 视点相对位移

$$\begin{bmatrix} L_x \\ L_y \\ L_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} T_x \\ T_y \\ T_z \end{bmatrix}_0 - \begin{bmatrix} T_x \\ T_y \\ T_z \end{bmatrix}_v \quad (1)$$

其中, 平移、旋转参数矩阵  $[R, t]$  如图 2b 所示. 式(1)中, 若  $L_x$  为正, 即视点左移, 则在每次更新的空间中提取左边界为填充线; 若  $L_x$  为负, 即视点右移, 则在每次更新的空间中提取右边界为填充线. 同

理, 若  $L_y$  为正, 则在每次更新的空间中提取下边界为填充线; 若  $L_y$  为负, 则在每次更新的空间中提取上边界为填充线; 若  $L_z$  为正、或负, 说明视点沿  $z$  轴纵深方向移动, 其空洞全边界均属于背景, 无需再提取填充线.



a. 视点变换方向和填充方向

$$[R, t] = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & T_x \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & T_y \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & T_z \end{bmatrix}$$

旋转量 位移量

b. 平移、旋转参数矩阵

图 2 视点变换

Step2.2 的说明如下:

利用等照度线的强度、方向以及被修复块的结构信息构造被修复块的优先权函数<sup>[9]</sup>

$$P(p) = C(p)D(p).$$

其中,  $C(p)$  是被修复块中非空洞像素点所占比例,

$$C(p) = \frac{\sum_{q \in \Psi_p \cap \bar{\Omega}} c(q)}{|\Psi_p|},$$

$|\Psi_p|$  表示被修复块  $\Psi_p$  的像素点总个数, 即  $n \times n$ ,

$\sum_{q \in \Psi_p \cap \bar{\Omega}} c(q)$  为被修复块  $\Psi_p$  中非空洞的像素点个数,

含有越多非空洞像素点的匹配块  $C(p)$  的值越大;

$D(p)$  为被修复块的纹理结构信息, 由中心点  $p$  的等照度线强度和方向表示, 表示被修复块的纹理结构信息强弱,

$$D(p) = \frac{|\nabla I_p^\perp \cdot \mathbf{n}_p|}{\alpha},$$

$\alpha$  是归一化因子,  $\mathbf{n}_p$  表示被修复块的中心点  $p$  在边界上的法线方向,  $\nabla I_p^\perp$  是等照度线在  $p$  点处的强弱和方向. 等照度线强度越大, 方向和法线方向的夹角越小, 则  $p$  点处的纹理结构信息越强, 优先级越高, 优先得到修复.

$p$  点处的等照度线强度和方向

$$\nabla I_p^\perp = [\nabla I_x^\perp(p), \nabla I_y^\perp(p)].$$

其中,  $\nabla I_x^\perp$  为输入图像  $A$  在水平方向上的等照度线矩阵,

$$\nabla I_x^\perp = I_x \cdot \left( 255 \times \sqrt{I_x^2 + I_y^2} \right);$$

$\nabla I_y^\perp$  为输入图像  $A$  在垂直方向上的等照度线矩阵,

$$\nabla I_y^\perp = I_y \cdot \left( 255 \times \sqrt{I_x^2 + I_y^2} \right);$$

$[I_x, I_y]$  为输入图像  $A$  在水平和垂直方向上的梯度矩阵,

$$[I_x, I_y] = \text{grad}(A).$$

### 3 实验

本文采用微软研究院交互虚拟媒体组提供的 8 组序列图像作为实验对象, 每组序列图像包括摄像头在空间中一个角度采集的 100 帧原始视点图和 100 帧深度图. 本文以 camera0 角度作为原始视点, 以 camera1 角度作为 Ballet 序列的变换视点, 以 camera2 角度作为 Breakdancer 序列的变换视点; 利用已知的空间平移、旋转校准参数矩阵进行 DIBR

三维变换, 生成虚拟图像, 生成过程使用 Matlab 编程实现. 在空洞填充算法的实验中, 截取 Ballet 序列第 6 帧  $450 \times 350$  像素的空洞块、第 63 帧  $560 \times 270$  像素的空洞块以及 Breakdancer 序列第 1 帧  $370 \times 150$  像素的空洞块作为空洞修复的测试样片. 填充测试过程中, 被修复块与滑动匹配块的大小均为  $7 \times 7$  像素. 空洞的填充算法使用 Matlab 与 C++ 混合编程实现.

图 3 所示为 Breakdancer 第 1 帧样片、Ballet 第 6 帧样片的完整填充过程, 即每隔 200 个纹理块被填充后剩余的空洞. 从图 3a 可以看出, 空洞的填补是从背景人物及墙面纹理开始, 从左至右, 纹理逐步延伸到空洞内部. 从图 3b 可以看出, 空洞的填补是从背景墙面纹理开始, 从左至右, 纹理逐步延伸到空洞内部.

图 4 所示为 Ballet 第 6 帧样片中, 每隔 200 个纹理块被填充后提取到的填充线. 可以看出, 填充线随着剩余空洞的填补而逐渐缩小, 方向由左至右, 即从背景一侧向空洞内部递进变化.

图 5 所示为 Ballet 第 6 帧样片中被修复块的位置及其被填充的路径. 图 5a 所示为 Ballet 第 6 帧空洞样片; 图 5b 所示为空洞填充时产生的 1 301 个被修复块的中心点位置; 图 5c 所示为被修复块的

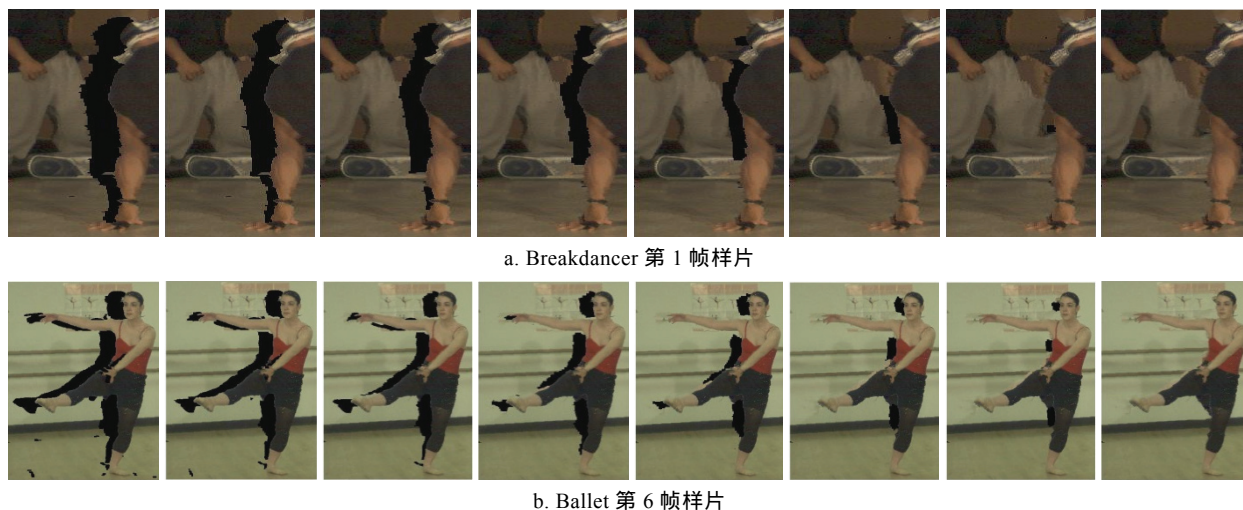


图 3 空洞的填充过程

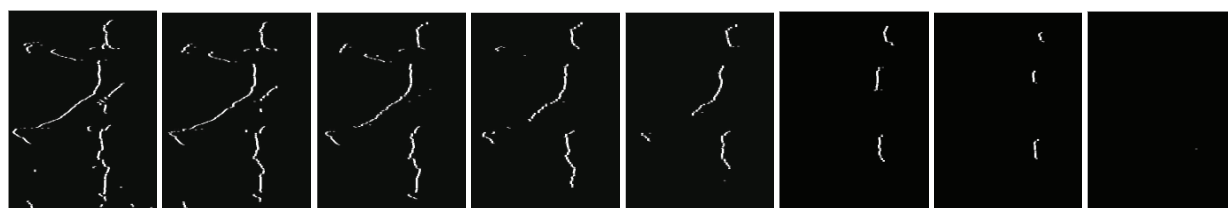
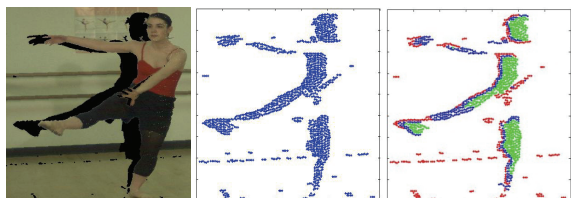


图 4 递进变化的填充线



优先顺序, 其中, 第 1~400 个被修复的空洞块的中心点用红色显示, 第 401~800 个被修复的空洞块的中心点用蓝色显示, 第 801~1 301 个被修复的空洞块的中心点用绿色显示. 可以看出, 本文算法能始终保持以左边的被修复块(背景纹理块)优先, 逐渐向空洞内部递进填充的效果.



a. 空洞 b. 被修复块的中心点 c. 被修复块的顺序

图 5 填充路径跟踪图

#### 4 同类算法比较

本文从主观评价和客观评价 2 个方面对 Criminisi 算法<sup>[9]</sup>、基于深度的模板匹配算法(简称模版匹配算法)<sup>[3]</sup>和本文算法修复后的虚拟图像作质量评估. 如表 1 所示, 其中第 3 列为经 DIBR 产生的含有空洞的测试样片.

主观而言, 相比其他算法, 本文算法能较好地

将背景纹理从背景区域延续到空洞内, 如 Ballet 的背景栏杆部分; 本文算法空洞修复的纹理更均匀, 对背景纹理的填充更清晰, 如 Breakdancer 人物的左肩处的背景光线, 浅色的背景光柱更接近于真实图像. 总体视觉效果上, 本文算法的 3 幅图像中, 背景纹理与前景人物之间的分割边缘更清晰, 视觉效果更好.

从客观评价角度, 本文采用均方误差值(mean squared error, MSE)和峰值信噪比(peak signal to noise ratio, PSNR)这 2 个图像质量评价指标, 将真实图像作为标准图像, 分别计算 3 种算法的图像与标准图像的 MSE 值和 PSNR 值. 表 2 所示为每组图像的 MSE 值, 可以看出, 本文算法的 MSE 比 Criminisi 算法平均低 26.439 3, 比模板匹配算法平均低 20.016 7, 说明本文算法比其他算法具有更低的 MSE, 修复的图像更接近真实图像. 表 3 所示为每组图像的 PSNR 值, 可以看出, 本文算法的 PSNR 比 Criminisi 算法平均高 1.6173, 比模板匹配算法平均高 1.3105, 说明本文算法比其他算法具有更高的 PSNR, 修复的图像更接近真实图像.

综上所述, 在主、客观标准上, 相比其他 2 种算法, 本文算法对 DIBR 图像中空洞的修复效果更好.

表 1 3 种算法修复结果的比较

序列图像	帧号	空洞图像	算法修复结果			真实图像
			Criminisi <sup>[9]</sup>	模板匹配 <sup>[3]</sup>	本文	
Ballet	63					
Break-dancer	1					

表 2 图像评价指标 MSE

测试样片 帧号	算法		
	Criminisi <sup>[9]</sup>	模板匹配 <sup>[3]</sup>	本文
6	45.220 1	42.276 4	34.636 8
63	115.357 8	101.144 2	50.479 7
1	161.843 2	159.732 8	157.986 8
平均值	107.473 7	101.051 1	81.034 4

表 3 图像评价指标 PSNR

测试样片 帧号	算法		
	Criminisi <sup>[9]</sup>	模板匹配 <sup>[3]</sup>	本文
6	31.577 5	31.869 8	32.735 4
63	27.510 3	28.081 4	31.099 6
1	26.039 9	26.096 9	26.144 6
平均值	28.375 9	28.682 7	29.993 2

## 5 结 语

针对 Criminisi 算法及基于深度的模板匹配对空洞边界噪声敏感的问题, 本文提出一种基于递进填充基线算法. 首先扩大空洞边界以消除深度误差造成的空洞边界上的残余前景噪声; 其次在空洞填充的遍历过程中, 根据视点变换方向对每次更新空洞提取填充线, 以限制被填充块的搜索范围, 使得被填充空洞块的择优顺序以背景纹理优先. 实验结果表明, 该算法能对 DIBR 虚拟图像的空洞进行修复并有效地抑制前景纹理的错误延伸. 对于一些具有奇异点的空洞, 如空洞的前景边界上具有“倒刺”凸起的情况下, 凸起像素点也满足背景边界的条件判断, 因此提取的填充线会有微小的误差, 从局部上改变了空洞填充的方向. 如图 3b 中, 填充到人物的脚部边缘时填充方向发生微小改变, 从脚部的纹理向上填充. 下一步工作将对该问题进行研究, 加强对填充线的约束, 以得到更符合人体视觉的虚拟图像.

## 参考文献(References):

[1] Fehn C. Depth-image-based rendering (DIBR), compression, and

transmission for a new approach on 3D-TV[C] //Proceedings of SPIE. Bellingham: Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers Press, 2004, 5291: 93-104

- [2] Oh K J, Yea S, Ho Y S. Hole filling method using depth based in-painting for view synthesis in free viewpoint television and 3-D video[C] //Proceedings of Conference on Picture Coding Symposium. Los Alamitos: IEEE Computer Society Press, 2009: 1-4
- [3] Luo Kai, Li Dongxiao, Feng Yamei, *et al.* Arbitrary view generation based on DIBR and depth-aided image inpainting[J]. Journal of Image and Graphics, 2010, 15(3): 443-449(in Chinese)  
(骆 凯, 李东晓, 冯雅美, 等. 基于 DIBR 和图像修复的任意视点绘制[J]. 中国图象图形学报, 2010, 15(3): 443-449)
- [4] Lu X H, Wei F, Chen F M. Foreground-object-protected depth map smoothing for DIBR[C] //Proceedings of IEEE International Conference on Multimedia and Exposition. Los Alamitos: IEEE Computer Society Press, 2012: 339-343
- [5] Yu Siwen, Peng Zongju, Yu Mei, *et al.* Depth video transmission scheme for free viewpoint video system[J]. Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics, 2013, 25(12): 1834-1841 (in Chinese)  
(余思文, 彭宗举, 郁 梅, 等. 面向自由视点视频系统的深度视频传输方法[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2013, 25(12): 1834-1841)
- [6] Chen W Y, Chang Y L, Lin S F, *et al.* Efficient depth image based rendering with edge dependent depth filter and interpolation[C] //Proceedings of IEEE International Conference on Multimedia and Exposition. Los Alamitos: IEEE Computer Society Press, 2005: 1314-1317
- [7] Liu Zhanwei, An Ping, Liu Suxing, *et al.* Arbitrary view rendering based on DIBR and image merge[C]. Journal of Image and Graphics, 2007, 12(10): 1696-1700(in Chinese)  
(刘占伟, 安 平, 刘苏醒, 等. 基于 DIBR 和图像融合的任意视点绘制[J]. 中国图象图形学报, 2007, 12(10): 1696-1700)
- [8] Paradiso V, Lucenteforte M, Grangetto M. A novel interpolation method for 3D view synthesis[C] //Proceedings of 3DTV-Conference: The True Vision-Capture, Transmission and Display of 3D Video (3DTV-CON). Los Alamitos: IEEE Computer Society Press, 2012: 1-4
- [9] Criminisi A, Perez P, Toyama K. Region filling and object removal by exemplar-based inpainting[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2004, 13(9): 1200-1212
- [10] Reel S, Wong K C P, Cheung G, *et al.* Disocclusion hole-filling in DIBR-synthesized images using multi-scale template matching[C] //Proceedings of IEEE Visual Communications and Image Processing Conference. Los Alamitos: IEEE Computer Society Press, 2014: 494-497