垂直方向立体接缝雕刻缩放算法

龚永义"关柏良"曾 坤"李可宏"吴贺丰"罗笑南"

¹⁾(广东外语外贸大学信息学院 广州 510006)
 ²⁾(中山大学软件学院 广州 510006)
 ³⁾(数字家庭国家工程研究中心(中山大学) 广州 510006)

摘 要 立体图像缩放是图像处理领域的重要研究内容. Basha 等人^[14]提出一个新颖的立体接缝雕刻(stereo seam carving)算法,但是由于无法避开立体图像左右视图中的视角外区域和被遮挡区域,Basha 方法在选取水平走向立体接缝时会出现同列多像素和间隔缝隙现象.因此,Basha 方法不适用于垂直方向的立体图像缩放处理.针对Basha 方法的上述局限性,作者提出了一种适用于垂直方向缩放的几何一致性立体接缝雕刻(stereo seam carving)算法.首先,作者引入基于视差的实投影和虚投影两个策略,以解决 Basha 方法中出现的同列多像素和间隔缝隙现象,并提出了一种新的水平走向立体接缝定义.然后基于该定义,提出了一个改进的几何一致性立体接缝雕刻算法,该算法不仅保持原 Basha 算法在水平方向的缩放功能,同时较好地实现垂直方向的立体图像缩放.作者提供了若干实验数据说明算法是有效的.

关键词 立体接缝;视差图;被遮挡区域;实投影策略;虚投影策略 中图法分类号 TP391 **DOI**号 10.11897 SP. J. 1016.2017.02589

Stereo Seam Carving for Vertical Retargeting

GONG Yong-Yi¹⁾ GUAN Bo-Liang²⁾ ZENG Kun²⁾ LI Ke-Hong¹⁾ WU He-Feng¹⁾ LUO Xiao-Nan³⁾ ¹⁾(Cisco School of Informatics, Guangdong University of Foreign Studies, Guangzhou 510006) ²⁾(School of Software, Sun Yat-Sen University, Guangzhou 510006) ³⁾(National Engineering Research Center of Digital Life, Guangzhou 510006)

Abstract Stereo image retargeting is an important problem in the field of image processing. Basha et al. proposed a novel stereo seam carving algorithm. However, Basha's approach does not work well for vertical retargeting because the approach fails in the case of existence of out-offield-of-view regions or occluded regions in the pair of stereo images. In other words, multiple pixels may appear in the same column or an interval gap may appear along the seam during the selection of a horizontal stereo seam. In this paper, we propose a geometrically consistent stereo seam carving approach to address the limitation of Basha's algorithm. Specifically, we firstly introduce two strategies: (1) visual disparity-based "real" projection and (2) visual disparitybased "virtual" projection. "Real" projection solves the problem of multiple pixels in the same column by mapping plane seam points from left view to right view based on visual disparity, while "virtual" projection deals with the interval gaps generated from "real" projection by utilizing

收稿日期:2015-05-29;在线出版日期:2016-04-05.本课题得到国家自然科学基金项目(61370160,61402120,61320106008)、广东省自然科学 基金项目(2015A030313578,2015A030313129,2014A030310348)、广东省科技计划项目(2015B010106005)、广东省高等学校科技创新项目 (2012KJCX0048)和广州市科技计划项目(2014J4100032)资助. 龚永义,男,1970年生,博士,教授,主要研究方向为图像配准、图像分割、图 像/视频缩放.E-mail: gongyongyi@gdufs.edu.cn.关柏良,男,1991年生,硕士研究生,主要研究方向为 3D 图像缩放. 曾 坤(通信作者), 男,1978年生,博士,副教授,主要研究方向为图像处理等.E-mail: zengkun@gmail.com.李可宏,男,1990年生,硕士,主要研究方向为 3D 图像缩放.吴贺丰,男,1985年生,博士,讲师,主要研究方向为计算机视觉、图像处理等.罗笑南,男,1963年生,博士,教授,博士生导师,主要 研究领域包括计算机图形学与 CAD、图像处理等.

seam segments. Then, we introduce a novel definition of horizontal stereo seam based on these two strategies. Horizontal stereo images consist of a seam in left view generated by dynamic programming and a corresponding seam in right view obtained by "real" and "virtual" projection. Finally, we propose a new stereo seam carving algorithm that not only preserves the effectiveness of Basha's algorithm for horizontal retargeting but also works well for vertical retargeting. We demonstrate its effectiveness on a number of testing stereo images.

Keywords stereo seam; disparity map; occluded region; real projection; virtual projection

1 引 言

随着各类便携式显示设备的普及,人们对立体 可视数据的播放提出新的需求.可以说,在不同分辨 率显示设备上播放包括立体影视,立体图像等在内 的立体可视数据必将成为一种潮流.由此我们遇到 一个亟待解决的问题:如何获取适合在不同分辨率 显示设备上播放的立体可视数据.显然,为每一特定 分辨率的显示设备拍摄相应分辨率的可视数据是不 现实的.一种经济有效的方法是:设计合适的算法, 对立体可视数据进行缩放处理.立体可视数据缩放 处理的基础是:立体图像缩放.

立体图像缩放研究的基本思想是设计合适的算法,改变源立体图像的分辨率,以便其在特定分辨率 的显示设备上显示.在缩放过程中,如何突出显示源 立体图像中的显著区域且尽量避免扭曲是立体图像 缩放必须关注的一个关键问题.近十多年来,针对平 面显示设备,研究人员已设计出大量高效的内容感 知图像缩放算法^[1-5],但由于立体图像视差等内在特 性的限制^[6-7],平面图像缩放的研究成果并不能直接 用于立体图像缩放.因为立体图像左右视图之间存 在像素级的对应关系,直接应用平面图像缩放算法 处理立体图像缩放,会破坏缩放后立体图像左右视 图像素之间应有的对应关系(见图 1),破坏原有视 差关系.

鉴于此,研究人员开始将立体图像左右视图的 对应关系、视差等立体图像特有的属性作为限制条 件,与已有的平面图像缩放算法相结合,研究适用于 立体图像缩放的算法^[8-23].与平面图像缩放算法分 类相似,目前已有的立体图像算法大致可归为两类: 离散型立体图像算法^[8-23]和连续型立体图像算 法^[15-22].

本文提出一种适用于垂直方向缩放的几何一致 性立体接缝雕刻(stereo seam carving)算法,完善



图 1 平面图像接缝雕刻(seam carving)方法^[1] 直接应用于 双目立体图像缩放((a)缩小后的左视图;(b)缩小后的右视 图;(c)缩小后左右视图对应的视差图;(d)、(e)、(f)分别是未 经缩放的正常双目立体图像的左视图、右视图和视差图,对比 视差图(c)、(f),可以看出,视差图(c)中出现大量的镂空区 域,表明缩放处理后的左右视图(a)、(b)像素之间的对应关系 被破坏)

Basha 的立体图像缩放方法^[14],实现内容感知的立体图像水平和垂直方向全方位缩放.Basha 的方法 建立在基于视差对应的立体接缝(stereo seam)基础 上,以保持立体图像左右视图视差一致性和几何一 致性为前提,分析选取立体接缝时遇到的双目立体 图像中的被遮挡区域问题.其中,Basha 定义的立体 接缝由二条分别位于立体图像左右视图中的平面接 缝组成,它们之间存在"基于视差"的像素级一一对 应关系,如图 2(a).传统平面接缝由四连通或八连 通的连续像素组成,平滑连续的平面接缝可以较好 地缓解因删除接缝而产生的图像内容错位,缓解图 像失真程度.与传统平面图像的接缝不同,由于存在 像素对应限制,为确保立体接缝中左右视图中平面 接缝像素级的对应关系,Basha 的方法允许立体接 缝位于左右视图中的平面接缝是分段连续的.

但是,正如 Basha 等自己指出的,他们的立体接 缝雕刻方法只适用于水平方向的立体图像缩放,并 不适用于垂直方向的立体图像缩放.进行垂直方向 缩放时,需要选取水平走向立体接缝.如图 2(b),在 右视图的接缝线

(a)



(b)

右视图的接缝线

图 2 基于 Basha 方法^[14]构建垂直走向立体接缝和水平走向立体接缝((a)左右视图中的平面接缝构成合法的垂直走向立体接缝;(b)左右视图中的平面接缝不能构成合法的水 平走向立体接缝;因为右视图中接缝出现同列多像素和间隔缝隙问题,不是合法的接缝^[1])

左视图中选择一条水平走向平面接缝、其基于视差 所对应的右视图平面接缝可能出现错位,断裂等现 象,导致无法找到符合 Basha 定义的立体接缝、作为 补救措施,Basha 直接采用等比例缩放方法进行垂 直方向的缩放.但是,等比例缩放的方法不是内容感 知的图像缩放方法,不能突显重要区域.

我们分析认为, Basha 方法出现上述局限性的 主要原因在于 Basha 方法中关于立体接缝的定义. 根据双目立体成像原理,立体图像中"遮挡-被遮挡" 现象只会出现在水平方向(见图 3),垂直方向不存 在这种现象.因此,当采用 Basha 方法进行水平方向 缩放时,可以通过规避被遮挡区域的策略,成功选取 合适的满足基于视差 1-1 对应关系的垂直走向立体 接缝.但进行垂直方向缩放处理时,由于需要选取水 平走向立体接缝,被遮挡区域将无法回避,这成为 Basha方法进行垂直方向缩放处理失败的主要原 因.为此,本文提出一种新的立体接缝定义,基于该 定义,提出适用于垂直方向缩放的几何一致性立体 接缝雕刻算法,算法流程见图 4.结合 Basha 水平方 向缩放算法,我们的方法不仅保持原算法在水平方 向的缩放功能,同时较好地实现垂直方向的立体图 像缩放.



图 3 双目立体图像左、右视图像素对应关系(可视目标不同区域在左右视图中的投影图像.①⑦区域是左(右)目视角外区域,③⑤⑨区域是被遮挡区域.由于遮挡区域影响,双目成像可能存在错序现象,如左视图目标区域成像顺序为: ①②③④⑧⑥,右视图目标成像顺序:②⑧⑨④⑤⑥⑦,其中,④、⑧在左视图顺序为④⑧,右视图为⑧④,出现变序)

本文第2节回顾近年来关于立体图像缩放的一 些相关研究成果;第3节提出一种新的立体接缝定 义;第4节建立适用于垂直方向缩放的内容感知的 立体图像缩放算法;第5节对我们的方法进行实验 测试和分析;第6节是结论.



图 4 本文算法流程图(输入立体图像左右视图和对应的视差图,首先,在左视图找出一条水平走向接缝;然后,执行实投影和虚投影策略,得到位于右视图中对应的水平走向接缝,同时删除或增加左右视图找到的水平走向 接缝,反复执行以上步骤至立体图像缩放到指定大小;最后,输出缩放后的立体图像左右视图)

2 相关工作

根据图像数据维度的不同,内容感知的图像非 等比例缩放可分为平面图像缩放和立体图像缩放两 类.内容感知的平面图像非等比例缩放大致分为离 散型和连续型两类方法.离散型方法主要包括接缝 雕刻^[1]、分块处理^[2]、智能裁剪^[3]等方法.不足之处 是此类方法可能删除图像有效信息,破坏图像内容 原有的连续性.连续型方法主要基于网格变形模拟 图像缩放,大致流程是:首先构造覆盖原图像的网格 平面,然后在特定约束下进行网格变形处理,最后将 原图像映射到变形后的网格得到缩放后的图像^[4-5].

约束条件的选择与图像显著区域、图像特征保 持等有关.该类方法的缺陷主要体现在:(1)若网格 变形控制不恰当,可能出现网格叠加,破坏图像的连 续性;(2)可能引起图像扭曲.

近年来,内容感知的立体图像缩放开始得到研 究人员的关注^[8-23].但遗憾的是,平面图像缩放方面 的研究成果并不能直接应用于立体图像缩放.根据 视觉成像原理,在双目立体视觉中,人们通过双目视 差感知物体的深度信息,因此,保持左右视图视差的 一致性非常关键.直接将平面图像非等比例缩放应 用于双目立体图像,左右视图对应区域扭曲程度的 不一致将破坏左右视图原有的对应关系,产生垂直 视差,甚至对应缺失.

针对上述问题,研究人员开始将立体图像左右 视图的对应关系、视差等作为限制条件,与已有的平 面图像缩放算法相结合,研究适用于立体图像缩放 的算法,并取得很好的进展.归纳起来,已有成果可 分为离散型和连续型两类.

离散型立体图像缩放方法主要是基于裁剪 (cropping)与基于接缝雕刻的方法.Niu等人^[8-9]提 出基于裁剪的立体图像缩放方法,该方法分别设置 两个窗口在输入立体图像对上移动,基于美学观点 和视差约束选取合适位置裁剪窗口大小的图像内 容,然后进行等比例缩放以适应不同尺寸的显示屏 幕.裁剪的方法容易丢失图像信息,适用于重要物体 比较集中的场景,当立体图像重要物体占整幅图像 较大空间时,必然裁剪掉重要目标的部分信息.基于 接缝雕刻的方法采用删除/增加离散点的方法,比基 于裁剪的方法适用于更多场景.Utsugi等人^[10]最早 将接缝雕刻算法应用于双目立体图像,该方法得到 左图待删除的接缝中像素之后,在右图中找到左图 接缝中像素的所有对应像素,进行相同的删除操作. 但是,"被遮挡"区域的存在使得左右视图中并非每 个点都能找到对应点,错误的匹配使得基于 Utsug 方法的立体图像缩放出现较严重的错位现象.Yue 等人[11] 将图像分割的思想引入立体图像缩放,首先 基于 Panum 融合区域精确分割出图像中的重要物 体,进行立体接缝雕刻操作时避免删除重要物体的 内容,完全保持图像中的显著特征,这种方法能较好 地保持重要物体的完整性和连续性,但是,对于立体 图像的立体信息,如视差一致性等没有很好地保持. Wang 等人^[12]提出基于 3D 显著检测的立体接缝雕 刻方法,指出现有的立体图像缩放主要基于 2D 视 觉注意机制检测显著区域,忽略了由立体图像深度 (Depth)产生的显著信息.并结合 2D 显著特征与深 度特征构建新的 3D 显著检测方法,实现对重要物 体特征的保持. Basha 等人[13-14] 提出几何一致的接 缝雕刻立体图像缩放算法,该算法严格遵循两个约 束:(1)同时保留或删除左右眼视图的对应点; (2)保留被遮挡点(Occluded Points).该方法以左 右视图能找到对应点为前提选择待删除的接缝,在 保持图像的几何一致性方面效果较好.但是,Basha 的方法只能处理立体图像水平方向的缩放,并不适 用于垂直方向的缩放^[14,23].本文将详细分析 Basha 方法[14]失效的内在原因,提出一种适用于垂直方向 缩放的几何一致性立体接缝雕刻算法.

连续型方法主要是基于网格变形的方法,此类 方法能够弥补离散型方法破坏图像连续性的缺 陷^[15-22]. Chang 等人^[15]提出内容感知的立体图像编 辑方法,利用 SIFT 尺度不变特征变换方法找到左 右图的稀疏对应点,并在网格变形的约束能量中加 入了稀疏点的对齐约束和视差一致性约束,较好地 保留图像视差信息. Cho 和 Kang^[16]提出基于立体 信息的显著区域检测方法,采用网格变形进行立体 图像缩放更好地避免立体图像目标变形并减少视觉 不适性. Lee 等人^[17]提出 scene warping 立体图像缩 放方法,该方法根据深度和色彩信息将立体图像对 分解为多个层,对覆盖每一图像层的网格进行不同 程度的缩放以达到突出重要物体,避免图像扭曲的 目标. Lin 等人^[18]提出目标一致变形的立体图像缩 放方法,对图像内容进行分割并对每个目标赋予显 著值,将像素级别网格变形方法扩展到目标级别,减 少图像扭曲. Li 等人[19] 提出一种基于区域的深度保

持立体图像缩放方法,将立体图像内容划分为不同 的区域,在网格变形能量函数构造中,尽量保持独立 区域与被遮挡区域网格宽度不变,使成对区域网格 一致变形,同时保持图像显著区域的特征.但是,这 些方法对处理包含瘦长直线场景的立体图像效果不 佳,稀疏对应关系局限于图像的场景结构.基于此, 文献[20-22]通过改善立体图像显著特征检测提出 新的网格变形立体图像缩放方法. Liu 等人^[20]在显 著特征检测步骤中加入梯度信息以及直线检测结 果,在能量函数构造时增加了直线特征的权重.Li 等人^[21]采用 Hough 变换检测立体图像的直线特 征,并在网格变形过程中约束直线特征不发生扭曲 变形,解决了网格变形方法容易导致直线特征扭曲 失真的问题.由于基于 SIFT 特征点构造稀疏对应 点的方法在特征不明显的区域往往失效,Yoo 和 Yea 等人^[22]采用 GPU 计算网格级别的稀疏视差 图,并将梯度信息与视差信息引入显著特征检测,使 特征不明显的区域也能够取到较好的缩放效果.当 缩放比例较大时,基于网格变形的立体图像缩放易 导致图像内容扭曲.

总体而言,离散型立体图像算法和连续型立体 图像缩放算法各有优势和局限性.离散型方法思路 简单,但易出现图像内容错位、断裂或丢失的现象. 连续型方法能较好地保持图像的连续性,但易出现 图像内容扭曲的现象.

3 水平走向立体接缝定义

我们认为,Basha 方法^[14]不能直接用于垂直方 向内容感知立体图像缩放的关键原因在于立体接缝 定义的局限性.本节我们首先分析导致 Basha 立体 接缝定义局限性的原因;然后,引入基于视差的实投 影策略和基于虚投影的拼接策略解决原立体接缝定 义的局限性,在此基础上,给出一个新的水平走向立 体接缝定义.

根据双目立体视觉成像原理(如图 4),立体图 像左右视图中除被遮挡区域像素、视角外区域像素 外,其它可视区域像素一定存在基于视差的一一对 应关系.人们通过左右视图可视区域对应像素的视 差感知物体的深度信息.另一方面,根据双目成像原 理,在立体图像中,只有水平方向可能存在被遮挡区 域和视角外区域,如图 3 中的被遮挡区域③⑤,视角 外区域①⑦.被遮挡区域、视角外区域的共同特点是 仅在一个视图可视,在另一视图中无对应可视区域. 由于无对应区域,因此,被遮挡区域像素、视角外区 域像素并不存在视差.为处理方便,本文沿用 Basha 方法^[14],规定被遮挡区域像素、视角外区域像素的 视差为 0.

3.1 Basha 立体接缝定义的局限性

为描述方便,我们先引入部分符号. 假设{ I_L , I_R } 是大小为 $m \times n$ 的立体图像, I_L , I_R 分别是左、右视 图,**D**是以左视图为参照图的立体图像视差矩阵(本 文通过 SGM 算法^[7]得到**D**). Basha^[14]的垂直走向 立体接缝定义如下.

定义 1. 垂直走向立体接缝. $S = \{S_L, S_R\}$ (如 图 2(a))由两条分别位于立体图像 $\{I_L, I_R\}$ 左右视 图上的垂直走向逐段连续平面接缝 S_L, S_R 组成. S_L , S_R 的像素之间存在基于 **D** 的对应关系:

 $c_{R}^{r} = c_{L}^{r} + D(r, c_{L}^{r}), r = 1, ..., m$ (1) 其中, $S_{L} = \{(r, c_{L}^{r})\}_{r=1}^{m}, S_{R} = \{(r, c_{R}^{r})\}_{r=1}^{m}, (r, c_{L}^{r}), (r, c_{R}^{r}) \mathcal{O}$ 别是左、右平面接缝中第 r 行像素的行列 坐标, $D(r, c_{L}^{r})$ 是左视图平面接缝第 r 行像素与右 视图中对应像素的视差.

立体图像缩放的关键条件是,保持立体图像像 素基于视差的对应关系,避免出现垂直视差.为遵循 该关键条件,Basha 方法要求所选择的立体接缝必 须满足式(1),不得删除被遮挡区域和视角外区域 像素.

但是,正如 Basha 等自己指出的,他们的方法并 不适用于垂直方向的立体图像缩放处理.下面,我们 分水平方向和垂直方向缩放两种情形,详细分析 Basha 方法在水平方向有效,却不适用于垂直方向 缩放的原因.

水平方向立体图像缩放的关键是选取垂直走向 的立体接缝. Basha 的策略是:首先,在左视图选取 平面接缝,若在选取过程中遇到被遮挡区域或视角 外区域,就对接缝执行断裂操作,沿断裂行水平方向 搜索,寻找新的接缝片段起始像素,以期避开上述区 域;然后,根据式(1)映射得到右视图的平面接缝(如 图 2(a)),从而得到垂直走向立体接缝.由于被遮挡 区域和视角外区域沿水平方向不会横贯整幅图像, 因此,根据 Basha 的策略,一定可以成功选取避开被 遮挡区域和视角外区域的立体接缝,虽然该立体接 缝中左视图平面接缝每个像素的视差可能不同,但 式(1)只会将左视图平面接缝像素映射到右视图的 不同列,不会改变像素的行坐标,因此,删除该立体 接缝不会改变立体图像其它像素原有的行坐标,不 会破坏它们之间原有的对应关系,不会产生垂直视 差.因此,Basha方法在水平方向是有效.

与水平方向缩放选取垂直走向立体接缝不同,

垂直方向缩放需要选取水平走向的立体接缝. Basha^[14]本身并没有直接给出水平走向立体接缝的 定义.下面我们沿用 Basha 定义垂直走向立体接缝 的方式定义水平走向的立体接缝,然后分析该定义 失效的原因.

定义 2. 水平走向立体接缝. $S = \{S_L, S_R\}$ 由两条分别位于立体图像左右视图上的水平走向逐段连续平面接缝 S_L 和 S_R 组成. S_L , S_R 的像素之间存在基于视差矩阵 D的对应关系,

 $c_{R}^{c} = c + D(r_{L}^{c}, c), r_{R}^{c} = r_{L}^{c}$ (2) 其中, $S_{L} = \{(r_{L}^{c}, c)\}_{c=1}^{n}$ 和 $S_{R} = \{(r_{R}^{c}, c_{R}^{c})\}_{c=1}^{n},$ ($r_{L}^{c}, c), (r_{R}^{c}, c_{R}^{c})$ 分别是左、右平面接缝中像素的行 列坐标, $D(r_L^c, c)$ 是左视图平面接缝第 r_L^c 行 c 列像 素与右视图中对应像素的视差.

由于双目成像原理的限制,与选取垂直走向立体接缝可以完全避开视角外区域和被遮挡区域不同,选取水平走向立体接缝时,根本无法避开上述区域.因此,根据该定义,我们将无法得到有效的立体接缝.如图 5(a)中黑色接缝 S_L是一条有效的水平走向平面接缝,但是它基于式(2)在右视图的映射 S_T(图 5(b)黑色线)出现同列多像素(①、②框标记)和间隔缝隙(②、③框之间)现象,不能横贯右视图.所以,S_T不是一条有效的右视图平面接缝,从而无法得到有效的立体接缝.



图 5 同列多像素与间隔缝隙在视差图上的分析((a)立体图像左视图;(b)立体图像右视图;(c)视差图,黑色区域为视角外 区域和被遮挡区域.基于式(2),(a)中①区域、②区域接缝片段在右视图中的对应接缝为(b)中的①、②区域,出现同列多像 素现象.基于式(2),(a)中②区域、③区域接缝片段在右视图中的对应接缝为(b)中的②、③区域,出现间隔缝隙现象)

分析视差图(图 5(c)),我们认为定义 2 失效的 原因在于被遮挡区域和视角外区域的干扰.我们从 图 5 中立体图像的左右视图可以看到,在右视图中 出现同列多像素、间隔缝隙现象的区域一定是落在 被遮挡区域和视角外区域.由于左视图被遮挡区域 和视角外区域在右视图无对应点,若依然采用式(2) 对该区域内像素进行映射,必然产生无效的对应接 缝片段,导致同列多像素现象.同理,由于右视图的 被遮挡区域和视角外区域在左视图无对应点,因此, 左视图平面接缝基于式(2)的映射不可能在这些区 域有映射点,从而出现间隔缝隙.

综合上述分析,我们可以知道,直接采用基于视 差映射的 Basha 方法无法得到有效的水平走向立体 接缝,定义 2 是无效的.症结在于:无法避免基于视 差映射而产生的同列多像素和间隔缝隙.

3.2 水平走向立体接缝

根据前文分析,我们知道 Basha 方法不适用于 垂直方向图像缩放的原因是:(1)基于视差的映 射(式(2))将位于左视图被遮挡区域的接缝像素 $\Omega_{R,O}\Omega_{R,N}\Omega_{R,O}\Omega_{L,N}\Omega_{R,N}\Omega_{L,S}\Omega_{R,O} \{\Omega_{L,S},\Omega_{R,O}\}\Omega_{L,S}\Omega_{R,O}$ $\Omega_{L,S}\Omega_{L,S}\Omega_{R,O}$ { S_L , S_R } { $\Omega_{L,S}$, $\Omega_{R,S}$ } P_1 , P_2 $S_L\Omega_{L,S}S_L$ $\Omega_{R,O}V_P(S_L)V_P(S_L)V_P(P_1)V_P(P_2)\Omega_{R,O}V_P(P_1)V_P$ (P_2) $\Omega_{R,O}^{[1]}V_P(P_1)V_P(P_2)$ 映射到右视图,导致右视 图所对应的平面接缝出现同列多像素现象;(2)由于 右视图被遮挡区域在左视图中无对应点,从而左视 图平面接缝在右视图上的映射会在右视图被遮挡区 域处出现间隔缝隙.针对上述问题,我们先给出两个 策略,实投影策略和拼接策略;然后,提出一种新的 水平走向立体接缝定义.

3.2.1 基于视差的实投影

策略 1. 基于视差的实投影. 假设 $p_L = \{(r_L, c_L)\}$ 是立体图像左视图上的像素, D 是视差矩阵. 则 p_L 基于 D 在右视图上的实投影像素为

$$p_{R} := P(p_{L}) = \{(r_{R}, c_{R})\}, (r_{R}, c_{R})$$

$$= \begin{cases} \text{Null}, & p_{L} \in \Omega_{0} \\ (r_{L}, c_{L} + D(r_{L}, c_{L})), & p_{L} \in \Omega_{1} \\ \text{Null}, & p_{L} \in \Omega_{2} \end{cases}$$
(3)

其中,r.,c.为像素的行、列坐标, Ω_0 , Ω_2 分别是位于 立体图像左视图中的视角外区域和被遮挡区域, Ω_1 是左视图中除 Ω_0 和 Ω_2 外的双目可视区域, $D(r_L, c_L)$ 是左视图像素 p_L 与右视图中对应像素 p_R 的视差, Null 表示无实投影像素.

为方便起见,我们称像素对 (p_L, p_R) 为立体图 像位于坐标 (r_L, c_L) 处的立体像素.立体像素的坐标 以左视图像素坐标为准.

由于左视图中被遮挡区域和视角外区域像素在 右视图不存在对应点,因此策略1的实投影定义是 合理的. 通过策略 1,我们可以有效地避免左视图 平面接缝单纯基于视差投影时产生的同列多像素现 象(如图 6(b)). 同时,由于右视图中仅被遮挡区域 和视角外区域像素在左视图不存在对应点,因此 左视图平面接缝基于策略 1 的实投影可能且仅可 能在右视图的视角外区域和被遮挡区域存在间隔 缝隙.



图 6 基于视差的实投影与基于虚投影的接缝片段拼接((a)立体图像左视图,黑色线是一条平面接缝;(b)立体图像 右视图,黑色线是左视图平面接缝在右视图上的实投影,已避免同列多像素现象;(c)立体图像右视图,黑色线是在实 投影(b)基础上,基于虚投影拼接接缝片段,已填补间隔缝隙)

3.2.2 基于虚投影的接缝片段拼接

如何拼接因基于策略1实投影而出现的间隔缝隙,是构建右视图平面接缝的另一个关键.根据策略1 右视图间隔缝隙分两类:一类位于视角外区域,一类 位于被遮挡区域.

当间隔缝隙位于视角外区域时,由于该区域与 左视图完全无关,因此可以采用传统的接缝构建方 法^[1],在该区域独立构建一段接缝片段,进行缝隙 拼接.

当间隔缝隙位于被遮挡区域时,由于被遮挡区 域的产生与左视图的对应遮挡区域有关,因此直接 采用传统方法构建缝隙接缝片段的方式不可行.被 遮挡区域不恰当的像素变化,会改变左右视图原有 的遮挡关系,因此该区域的拼接必须考虑所对应位 于左视图的遮挡区域.基于遮挡区域与被遮挡区域 之间的遮挡投影关系,下面我们提出"虚投影"方法, 通过将遮挡区域上的接缝片段"虚投影"到被遮挡区 域的方法,构建接缝片段,实现拼接.

根据双目成像原理,保持立体图像左右视图之间的遮挡关系的关键是:遮挡区域像素和所对应被 遮挡区域像素必须同时增加,或同时删除.遗憾的 是,单纯基于立体图像左右视图去确定遮挡区域内 部像素和被遮挡区域内部像素之间的对应关系是非 常繁琐的.

进一步分析左右视图的对应关系,可以发现,由 于被遮挡区域仅左(右)视图可见,只要保持遮挡区 域和被遮挡区域的覆盖范围对应关系不变,遮挡区 域内部和被遮挡区域内部像素的增加与删除并不需 要保持投影对应关系,不会改变立体图像原有的遮 挡-被遮挡关系.即只要保持遮挡-被遮挡区域轮廓 线元素之间的对应关系,遮挡-被遮挡区域像素的不 一致变化不会对图像其它区域产生影响.至此,我们 知道:只要确定遮挡区域轮廓在被遮挡区域的对应 点,即可以任意方式构建被遮挡区域内的接缝片段. 由此,我们给出"接缝虚投影"定义.

定义 3. 如图 7, 假设 { $\Omega_{L,S}$, $\Omega_{R,O}$ } 是立体图像 中的一个遮挡-被遮挡区域对,其中 $\Omega_{L,S}$ 是位于左视 图上的遮挡区域, $\Omega_{R,O}$ 是位于右视图上 $\Omega_{L,S}$ 所对应 的被遮挡区域, $\Omega_{R,S}$ 是位于右视图上与 $\Omega_{L,S}$ 所对应 的被遮挡区域, $\Omega_{R,S}$ 是位于右视图上与 $\Omega_{L,S}$ 对应的 可视区域. 若 { S_L , S_R } 是位于 { $\Omega_{L,S}$, $\Omega_{R,S}$ } 的基于视 差映射的立体接缝片段, P_1 , P_2 是 S_L 位于 $\Omega_{L,S}$ 上的 起止像素,则 S_L 在 $\Omega_{R,O}$ 上的"虚投影" V_P (S_L) 定 义为,

(1) $V_P(S_L)$ 的起止像素 $V_P(P_1), V_P(P_2)$ 位于 $\Omega_{R,O}$ 边界,且

 $r(V_P(P_i)) = r(U(P_i)), i = 1, 2$

其中,U(P)表示取左视图中像素 P 所在列行坐标 尽可能大但不大于r(P)的 $\Omega_{L,s}$ 边界像素,r(P)表 示取像素 P 的行坐标.

(2) 以 $V_P(P_1)$, $V_P(P_2)$ 为起止像素, 以 $\Omega_{R,O}$ 为 搜索范围, 按传统方式^[1] 构建像素 $V_P(P_1)$ 和 $V_P(P_2)$ 之间的接缝片段.





图 7 虚投影(假设{ $\Omega_{L,s}, \Omega_{R,O}$ }是因长方体 A 的遮挡而形成的一个"遮挡-被遮挡"区域对,其中 $\Omega_{L,s}$ 是位于左视图上的遮挡区域, $\Omega_{R,O}$ 是位于右视图上与 $\Omega_{L,s}$ 所对应的被遮挡区域,显然,区域 $\Omega_{L,s}$ 的变化会影响 $\Omega_{R,O}$.若{ S_L, S_R } 是位于{ $\Omega_{L,s}, \Omega_{R,s}$ }的基于视差映射的立体接缝片段, P_1, P_2 是 S_L 位于 $\Omega_{L,s}$ 上的起止像素,则 S_L 在 $\Omega_{R,O}$ 上的"虚投影" $V_P(S_L)$ 定义为:1) $V_P(S_L)$ 的起止像素 $V_P(P_1), V_P(P_2)$ 位于 $\Omega_{R,O}$ 边界,2)以 $V_P(P_1), V_P(P_2)$ 为起止像素,以 $\Omega_{R,O}$ 为搜索范围,按传统方式^[1]构建像素 $V_P(P_1)$ 和 $V_P(P_2)$ 之间的接缝片(详细内容见定义 3))

(3) 通过(1),(2) 得到的接缝片段即为 S_L 在 Ω_{R.0}上的"虚投影".



虚投影与视差和遮挡区域相关.我们通过视差

是否为零,判断视图区域是否为被遮挡区域,并通过 以下规则检测被遮挡区域所对应的遮挡区域,如图 8 所示:

(1) 假设 $\Omega_{R,o}$ 是位于立体图像右视图上的一个 被遮挡区域, $\Omega_{R,N}$ 是与 $\Omega_{R,o}$ 右相邻的可视区域, $\Omega_{L,N}$ 是 $\Omega_{R,N}$ 位于左视图的对应可视区域,则

若 $\Omega_{L,N}$ 的左相邻可视区域是可视区域,则 $\Omega_{R,o}$ 所对应的遮挡区域为与 $\Omega_{L,N}$ 左相邻的可视区域,见 图 8(a).

若 $\Omega_{L,N}$ 的左相邻可视区域是被遮挡区域,则 $\Omega_{R,o}$ 所对应的遮挡区域为与 $\Omega_{L,N}$ 右相邻的可视区域,见图 8(b).

(2) 假设 $\Omega_{L,o}$ 是位于立体图像左视图上的一个 被遮挡区域, $\Omega_{L,N}$ 是与 $\Omega_{L,o}$ 左相邻的可视区域, $\Omega_{R,N}$ 是 $\Omega_{L,N}$ 在左视图的对应可视区域,则

若 $\Omega_{R,N}$ 的右相邻可视区域是可视区域,则 $\Omega_{L,O}$ 所对应的遮挡区域为与 $\Omega_{R,N}$ 右相邻的可视区域.

若 $\Omega_{R,N}$ 的右相邻可视区域是被遮挡区域,则 $\Omega_{L,O}$ 所对应的遮挡区域为与 $\Omega_{R,N}$ 左相邻的可视 区域.

综上所述,我们归纳出以下接缝片段拼接策略. 策略2. 基于虚投影的接缝片段拼接.假设 S_L 是立体图像左视图上的一条逐段连续水平方向平面 接缝.D 是视差矩阵.S_T=P(S_L)是位于立体图像右 视图上的存在间隔缝隙的平面接缝片段,其中,间隔 缝隙仅位于右视图被遮挡区域和视角外区域,则,我 们按以下步骤拼接 S_T,构造有效的平面接缝 S_R.

若间隔缝隙位于视角外区域,以接缝片段中与 视角外区域相邻接缝片段边界像素为起点,以视角 外区域为搜索范围,按传统方式^[1]构建该区域内接 缝段.



图 8 两种不同的遮挡场景((a) $\Omega_{R,O}$ 是右视图被遮挡区域, $\Omega_{R,N}$ 是与 $\Omega_{R,O}$ 右相邻可视区域;(b) $\Omega_{L,N}$ 是 $\Omega_{R,N}$ 对应的左视图可视区域, $\Omega_{L,S}$ 是 $\Omega_{R,O}$ 对应的遮挡区域)

若间隔缝隙位于某被遮挡区域 Ω_{R.o},采用虚投 影方式构建接缝片段,如图 6(c).

3.2.3 一种新的水平走向立体接缝定义

基于策略1和策略2,我们的水平走向立体接 缝定义如下,

定义 4. 水平走向立体接缝 $S = \{S_L, S_R\}$ 由两条分别位于立体图像左右视图的水平走向逐段连续 平面接缝 S_L, S_R 组成,其中, $S_L = \{(r_L^e, c)\}_{e=1}^n, S_R$ 基 于策略 1 和策略 2 生成,首先,基于策略 1 得到 S_L 在右视图上的投影 $P(S_L)$,然后,基于策略 2,对 $P(S_L)$ 进行拼接处理,得右视图平面接缝 S_R .

图 6、图 9 进一步说明定义 4 的可行性和有效 性. 如图 6(a)、(b)分别是左右视图,图 6(a)中黑色 线为一条合法的平面接缝. 对该接缝分别执行实投 影和基于虚投影的拼接处理,得到与该接缝对应的 位于右视图中的平面接缝(见图 6(c)中黑色线),从 而得到水平走向立体接缝.



图 9 水平走向立体接缝((a)、(c)分别是立体图像的左、 右视图,(a)中黑色线为合法的平面接缝.对它们先后执行 实投影和基于虚投影的拼接处理,得到位于右视图中与黑 色线对应的平面接缝,见(c)中的黑色线,从而得到合法的 水平走向立体接缝.(b)中黑色线段是"执行实投影后,执 行基于虚投影的拼接处理前"的中间结果)

4 改进的几何一致性立体接缝雕刻 算法实现细节

为便于分析比较,我们沿用 Basha^[14]的方法构 建垂直方向立体接缝雕刻算法的能量函数.设 $\{I_L, I_R\}$ 是大小为 $m \times n$ 的立体图像,坐标(r,c)处 立体像素的能量函数由亮度项和立体几何项组成,

 $E_{\text{total}}(r,c,r^{\pm}) = E_{\text{intensity}}(r,c,r^{\pm}) + \alpha E_{3D}(r,c,r^{\pm})$ (4)

其中,亮度项主要由外观能量构成,立体几何项由深 度能量构成.α为经验参数,度量立体几何项的重要 性.r[±]表示立体接缝中第 c-1 列立体像素的行坐 标.由于水平走向立体接缝中的像素不一定连续,因此,r[±]可以是第 c-1 列的任意一行.

4.1 外观能量

删除一条水平走向立体接缝,必然会改变立体 图像中部分像素之间的相邻关系.为避免扭曲,我们 要求删除立体接缝对立体图像的梯度影响最小.我 们选用函数 *E*_{intensity}(*r*,*c*,*r*[±])度量删除立体接缝中 (*r*,*c*)处立体像素后左右视图中相应相邻点的梯度 变化,

 $E_{\text{intensity}}(r,c,r^{\pm}) = E_L(r,c,r^{\pm}) + E_R(r,c,r^{\pm})$ (5) (r,c)处立体像素在左视图和右视图中的像素基于策略1对应,因此,式(5)中 E_L 、 E_R 均根据 $E(r,c,r^{\pm})$ 计算,

 $E(r,c,r^{\pm}) = E^{v}(r,c) + E^{h}(r,c,r^{\pm})$ (6) 其中, E^{v} 度量垂直方向的梯度变化, E^{h} 度量水平方 向的梯度变化.垂直方向,

 $E^{v}(r,c) = |I(r+1,c) - I(r-1,c)|$ (7)

水平方向的梯度变化与立体接缝中位于(r[±], c-1)处的立体像素有关,

$$E^{h}(r,c,r^{\pm}) = \begin{cases} V_{1}, r^{\pm} < r \\ 0, r^{\pm} = r \\ V_{2}, r^{\pm} > r \end{cases}$$
(8)

具出

$$V_{1} = \sum_{\substack{k=r^{\pm}+1\\r^{\pm}}}^{r} |I(k,c-1) - I(k-1,c)|,$$
$$V_{2} = \sum_{\substack{k=r+1\\r^{\pm}}}^{r} |I(k-1,c-1) - I(k,c)|.$$

4.2 深度能量

选择左图接缝的时候还要考虑深度信息 *E*_{3D}. *E*_{3D}由三部分组成,

$$E_{3D}(r,c,r^{\pm}) = E_D(r,c,r^{\pm}) + \beta |D_n(r,c)| + \gamma |G(r,c)|$$
(9)

其中,*E*_D为度量视差图扭曲,其定义方式与外观能量相似,计算方法与式(6)~式(8)一样,只是将图像函数 *I* 替换为视差矩阵 *D*.在实际运算中,为了减少亮度值和视差值取值范围不一致带来的影响,需要事先将 *I* 和 *D* 都进行归一化处理.*D*_n是归一化的视差图.|*D*_n(*r*,*c*)|越小,表明视差越小,立体效果越差,越不需要关注.|*G*(*r*,*c*)|度量立体像素中左右视图像素亮度差异,我们认为左右视图真实对应像素之间的亮度差异应当比较小,

 $G(r,c) = |I_{L}(r,c) - I_{R}(r,c+D(r,c))| \quad (10)$

综合 4.1 节、4.2 节,我们得出垂直方向立体接 缝雕刻算法,算法流程见算法 1. **算法 1.** 垂直方向立体接缝雕刻缩放算法流程. 输入:尺寸为 *m×n* 的立体图像

输出:尺寸为(m-1)×n的立体图像,即垂直方向缩小 一个像素的立体图像

 1. 根据外观能量式(5)和深度能量式(9),计算立体图 像左视图每个像素点一个能量值;

2. 采用动态规划方法,找到左视图平面接缝;

3. 执行实投影策略,将左视图平面接缝映射到右视图;

4.根据实投影得到的右视图接缝片段,执行虚投影策
 略,拼接间隔缝隙,得到右图相应的水平走向接缝.

4.3 改进的几何一致性立体接缝雕刻算法

下面,结合 Basha^[14]的水平方向缩放算法,我们 给出改进的几何一致性立体接缝雕刻算法,

(1) 输入大小为 $m \times n$ 的立体图像 $\{I_L, I_R\}$;

(2)首先使用 Basha^[14]方法,进行水平方向1个 像素大小的缩放,然后,采用我们的方法(算法1), 进行垂直方向1个像素大小缩放;

(3)反复执行步骤(2),直至立体图像缩放至指定大小.

4.4 算法复杂度分析

下面,我们分析本文垂直方向立体接缝雕刻算 法的时间复杂度和空间复杂度.

假设输入大小为 *m*×*n* 的立体图像,对其采用 本文方法进行垂直方向 1 个像素的缩小处理.根据 算法 1,处理过程主要由 4 个步骤组成:

(1)根据外观能量式(5),计算立体图像左视图 每个像素点一个能量值,时间复杂度为O(m×n),空 间复杂度为O(m×n);根据深度能量式(9),计算 左视图一条能量值最小的水平走向接缝,即待删除 的一条左视图接缝,时间复杂度为O(n),空间复杂 度也为O(n);

(2)采用动态规划方法,找到左视图平面接缝,
 时间复杂度为 O(m×n),空间复杂度为 O(m×n);

(3)执行实投影策略,将左视图平面接缝映射到 右视图,时间复杂度为 O(n),空间复杂度为 O(n);

(4)根据实投影得到的右视图接缝片段,执行 虚投影策略,拼接间隔缝隙,得到右图相应的水平走 向接缝,时间复杂度为 O(n),空间复杂度为 O(n).

综合以上 4 个步骤,采用本文垂直方向立体接 缝雕刻算法删除或增加一条立体接缝所用时间复杂 度为 O(m×n),空间复杂度也为 O(m×n).

5 实验结果与分析

我们采用 CPU 为 Intel(R) Core(TM) i5-3470 3.20 GHz 和 4GB 内存的联想启天 M6410/19PC 平 台实现本文方法,并选择 Middlebury 等数据集验证 本文方法,分别对主体是人、物的立体图像,室内和室 外场景的立体图像进行处理.我们使用 MATLAB 软件实现我们的算法,直接调用 SGM 方法^[7]进行 视差图计算.本文所有实验中,能量式(4)中立体几 何项参数 α 取为 0.5.

我们对 3 组不同分辨率的 Aloe 立体图像进行 垂直方向 10%和 20%程度的缩小,不同的分辨率变 化程度与所需的运行时间如表 1 所示.

表 1 分辨率变化与运行时间关系表

分辨率变化	缩小比例/%	运行时间/s
427×370 → 427×333	10	39.46
$427 \times 370 \rightarrow 427 \times 296$	20	56.37
$384 \times 370 \rightarrow 384 \times 333$	10	26.56
$384 \times 370 \rightarrow 384 \times 296$	20	44.10
$342 \times 370 \rightarrow 342 \times 333$	10	21.10
$342 \times 370 \rightarrow 342 \times 296$	20	41.40

上述数据表明我们的方法运行时间与立体图像 的分辨率、缩放程度有关.根据4.4节算法复杂度分 析可知,处理分辨率越大的图像,n越大,每一条接 缝线需要查找的接缝点数目越多,进行图像缩放所 花费的时间越长.运行时间也受缩放比例大小的影 响,对同一图像,缩放程度越大,增加或删除的接缝 线数目越多,即运行4.4节的5个步骤次数越多,所 需的运行时间越长.

在实验过程中,我们根据图像的结构特征对能 量函数式(9)的权重系数进行适当调整,在后续实验 中,我们设β与γ分别固定为0.08 与0.5,以达到理 想的缩放效果.

5.1 保持图像重要区域特征的评价

与平面接缝雕刻方法^[1]类似,本文方法通过图 像梯度信息检测图像重要区域.人眼对梯度变化区 域敏感,而图像梯度较大的区域通常属于重要区域 的边缘,因此,选取接缝线时尽量避开此类区域,可 以较好地保持图像重要区域的特征.

我们分别采用本文提出的垂直方向立体接缝雕 刻算法和文献[14]提出的等比例缩放方法进行垂直 方向立体图像缩放处理,见图 10. 从图 10 中黑线对 比区域看出,本文的方法处理后,立体图像的重要区 域在整个图中比例更加合适,显著性更强.说明本文 提出的缩放算法能更好地突显图像重要区域特征.

在保持图像重要区域的同时,提供良好的视觉效果非常重要.为此,我们给出更多的实验数据说明我们方法不仅保持图像重要区域特征,也能提供良好的视觉效果.在图 11、图 12 中,我们用 Basha 的方法^[14]对立体图像水平方向缩小 17%,然后,用本

2599

文方法垂直方向分别缩小10%和20%.可以看到, 立体图像中重要目标依然保持较好的视觉效果,没 有出现等比例缩放中目标"变扁、变瘦"现象,符合人 们感观要求.

由于视觉效果是一种主观评价,目前没有标准 的量化评价标准,因此,我们邀请20位师生对我们





图 11 先用 Basha 方法^[14] 对立体图像(a)、(b)水平方向缩小 17%,再用本文方法在垂直方向分别缩小 10%、20%((a)、(b)为立体图像左、右视图;(c)、(d)为垂直方向缩小 10%的左、右视图;(e)、(f)为垂直方向缩小 20%的左、右视图)



图 12 先用 Basha 方法^[14] 对立体图像(a)、(b)水平方向缩小 17%,再用本文方法在垂直方向分别缩小 10%、20% ((a)、(b)为立体图像左、右视图;(c)、(d)为垂直方向缩小 10%的左、右视图;(e)、(f)为垂直方向缩小 20%的左、右视图)

的实验效果进行人工评价,并做出统计分析.对于缩 小后的立体图像,我们给出三个层次的评分等级,A 表示效果不错,B表示效果一般,C表示效果不好, 详细统计数据见表 2、表 3,直方图统计如图 13.

表 2 立体图像垂直缩小 10%效果主观评价

实验图像	А	В	С
Cloth	95 %	5 %	0
Aloe	90%	10%	0
People	90%	10%	0
Motorcycle	80%	20%	0

表 3 立体图像垂直缩小 20%效果主观评价

实验图像	А	В	С
Cloth	80%	20%	0
Aloe	60%	30%	10%
People	80%	15%	5 %
Motorcycle	70%	20%	10%

由所得统计数据分析,本文方法对立体图像垂 直方向缩小10%时,大部分调查者认为效果不错, 少数觉得效果一般,没有觉得效果不好的,说明本文



图 13 立体图像缩小效果主观评价(依次是 Middlebury 数据集的 Cloth、Aloe、People、Motorcycle,10%和 20%表示立体图像垂直方向缩小 10%和 20%)

方法对立体图像垂直方向缩小 10%时,可以达到较 好的视觉效果,符合人们的视觉感官.而对立体图像 垂直方向缩小 20%时,总体还是达到人们所能接受 的视觉效果,但是,由于缩小比例较大,可能会出现 显著目标部分细节丢失的情况,让人感觉不舒适,少 数调查者觉得效果不好.综合上述分析,本文方法能 较好地用于垂直方向立体图像的缩放,有效地突出 显著区域且较好保持显著区域信息不丢失,在主观 上满足人们的视觉要求,有良好的感观效果.

5.2 保持图像几何一致性的评价

我们从视差图比较和量化分析二个方面对本文 方法进行几何一致性评价.

视差图能直观地体现立体图像左右视图像素之间的对应关系.本文我们统一采用 Basha 的方法^[14] 对立体图像水平方向缩小 17%,然后,分别采用 Basha^[14]的等比例方法、传统的接缝雕刻方法^[1]、我 们的方法对立体图像垂直方向缩小 10%,图 14 是 部分实验结果视差图.

分析图 14 中的视差图,传统接缝雕刻方法^[1]直 接应用于双目立体图像缩放,对应视差图(图 14 (c))中有大片镂空,表明立体图像左右视图的对应 关系遭到严重破坏.相比之下,我们的方法进行缩放 后的立体图像视差图(图 14(d))几乎不会增加明显 的镂空区域,镂空区域与等比例缩放方法得出的视 差图(图 14(b))几乎一致.由此可以得出,经本文方 法处理后的立体图像不会丢失过多的左右视图像素 的对应关系,表明我们的方法在保持视差一致性方 面达到良好的效果,能较好地保持图像的几何一 致性.

同时,我们参考 Basha 的量化评价方法^[14],对

本文方法进行几何一致性评价. 设根据左视图接缝 雕刻操作得到缩放后的原始视差图为 \hat{D}_{o} ,缩放 后^[1,14]的立体图像计算得到的视差图为 \hat{D}_{SGM} . 通过 计算结果视差 \hat{D}_{SGM} 与理想视差 \hat{D}_{o} 之间的差异得到 视差扭曲评价指标B,用于评价立体图像缩放前后 的视差一致性,见式(11).

$$B = \frac{1}{N} \sum_{(i,j)} T(i,j),$$

$$T(i,j) = \begin{cases} 1, & |\hat{D}_{o}(i,j) - \hat{D}_{\text{SGM}}(i,j)| > 1\\ 0, & |\hat{D}_{o}(i,j) - \hat{D}_{\text{SGM}}(i,j)| \le 1 \end{cases}$$
(11)

式(11)中,N 表示缩放后图像的像素总数量,D(*i*,*j*) 表示图像 D 在第*i* 行第*j* 列的值.该指标计算缩放 后立体图像的视差与原始视差差异大于1个像素点 的个数占像素总数量的比重,B 越大表明立体图像 的视差扭曲程度越大.

设 B_s 、 B_N 、 B_o 分别为采用 Basha 方法^[14]、传统 平面接缝雕刻^[1]、本文方法进行立体图像缩放时 的视差扭曲指标.首先,我们直接采用 Basha 的方 法^[14]实现立体图像水平方向缩放,然后,分别采用 Basha^[14]的等比例方法、传统平面接缝雕刻^[1]、本文 的垂直缩放算法进行垂直方向缩放,并计算视差扭 曲指标 B_s 、 B_N 、 B_o .表4列出了对 Middlebury 数据 集的 Cloth、Aloe、Baby、Moebius、Flowers、People 和 Motorcycle 立体图像进行相同比例的缩放处理 后的视差扭曲指标.

实验图像	B_S	B_N	B_O
Cloth	4.21%	87.49%	10.94%
Aloe	5.29%	71.05%	15.36%
Baby	3.83%	89.76%	7.04%
Moebius	4.76%	83.17%	12.59%
Flowers	8.61%	84.92%	18.26%
People	3.11%	86.52%	7.90%
Motorcycle	2.31%	90.31%	8.61%

缩放方法视差扭曲程度对比

分析表 4,本文方法求得的视差扭曲指标 B_o 远 小于左右视图分别进行接缝雕刻的扭曲指标 B_N ,略 大于 Basha 方法的扭曲指标 B_s ,约为 B_s 的 2 倍.

立体图像缩放扭曲主要来源于水平方向非等比 例缩放和垂直方向非等比例缩放. Basha 方法^[14]缩 放由水平方向非等比例缩放和垂直方向等比例缩放 组成. 由于等比例缩放不会产生图像扭曲,因此, Basha 方法的扭曲值 Bs完全由水平方向缩放产生. 相较而言,本文方法由 Basha 方法^[14]的水平方向非 等比例缩放和本文的垂直方向非等比例缩放组成, 因此,本文方法产生的扭曲值 Bo由水平缩放和垂直



图 14 立体图像缩放前、后的视差图(首先统一采用 Basha 的方法^[14]对立体图像水平方向缩小 17%,然后,分别采用 Basha^[14]的等比例方法、传统的接缝雕刻方法^[11]、本文方法对立体图像垂直方向缩小 10%,各列为所对应的视差图. (a) 原始立体图像视差图;(b)等比例方法结果视差图;(c)传统的接缝雕刻方法结果视差图;(d)本文方法的结果视差图)

缩放叠加产生.由此可知,若仅考虑垂直方向的扭曲,本文方法产生的扭曲值与仅考虑水平方向缩放的 Basha 方法^[14]产生的扭曲值相近,说明本文方法 在避免垂直视差、保持几何一致性方面都取得一定成 效. 实验图 11、图 12 和图 14 表明我们的方法得到 的视差图比较平滑,与原始视差图差异很小,缩放效 果不影响观看效果. 图 15 是部分采用本文方法进行 立体图像缩放的红蓝效果图(印刷时采用黑白图).



图 15 立体图像红蓝图效果(依次是 Middlebury 数据集的 Baby、Cloth、Aloe 和 Moebius, 2 个一组, 每组中左图是原图的红蓝效果图, 右图是采用本文方法原图水平方向缩小 17% 和垂直方向缩小 10% 的红蓝效果图)



图 16 运用本文提出的立体接缝雕刻方法时,可能存在的丢 失图像细节信息现象((a)立体图像的左右视图;(b)选用本 文方法水平方向缩小 17%,垂直方向缩小 20%得到的结果; (c)部分细节丢失)

结论

我们提出一个垂直方向立体接缝雕刻缩放算 法.本文算法主要针对 Basha 方法^[14]的局限性进行 探索. Basha 提出的立体图像接缝雕刻算法以内 容信息和立体信息为基础,允许选取的立体接缝分 段连续.由于立体图像的立体信息来源于立体图像 左、右视图像素之间的对应关系, Basha 的方法要 求:立体接缝位于左视图和右视图的平面接缝像素 之间必须满足基于视差的对应关系.根据双目成像 原理,视差只存在于水平方向,所以,Basha方法用 于水平方向立体图像缩放时,可以通过避开左右视 图中的视角外区域和被遮挡区域,选取到合法的垂 直走向立体接缝.然而,Basha 等并未给出适用于垂 直方向立体图像缩放的立体接缝雕刻算法.而是作 为一种补救措施,Basha 等直接选用"等比例缩放策 略",用于垂直方向立体图像缩放.但是,等比例缩放 方法独立于图像内容进行立体图像缩放,无法突显立 体图像中的显著区域.

本文,我们详细分析 Basha 方法水平方向缩放 思想不适用于垂直方向缩放的内在原因,指出无法 避开立体图像左右视图中的视角外区域和被遮挡区 域是问题的关键.接着,提出基于视差的实投影和虚 投影两个策略,以解决选取水平走向立体接缝时遇 到的同列多像素和间隔缝隙现象,并提出一种新的 水平走向立体接缝定义.然后,基于该定义,提出垂 直方向立体接缝算法.最后,结合 Basha 方法^[14]中 水平方向缩放算法,提出一个改进的几何一致性立 体接缝雕刻算法.该算法不仅保持原 Basha 算法在 水平方向的缩放功能,同时较好地实现垂直方向的 立体图像缩放.我们提供了若干实验数据说明算法 是有效的.

必须指出的是,由于接缝雕刻算法内在的局限 性,本文方法在处理某些立体图像时,如果缩小比例 较大,可能存在删除显著物体的部分信息现象.如 图 16,立体图像 Aloe(图 16(a)第 1,2 行)包含较多 细节信息(如叶子部分),且重要目标几乎占据整幅 立体图像,对该立体图像进行较大程度的缩小时,不 得不删除部分经过重要物体的接缝,导致丢失部分 重要目标细节信息.同理,立体图像 Midd(图 16(a) 第 3,4 行)显著物体中,最上面的纸帽边缘信息在进 行缩小时也丢失.这是本文方法的不足,是我们进一 步开展研究需要解决的问题.

致 谢 感谢团队成员对本文成果的辛勤付出,感谢美国西肯塔基大学计算机系李祺博士的指点,特别感谢评审专家提供的宝贵意见和建议!

参考文献

- Avidan S, Shamir A. Seam carving for content-aware image resizing. ACM Transactions on Graphics, 2007, 26(3): 10
- [2] Barnes C, Shechtman E, Finkelstein A, et al. PatchMatch: A randomized correspondence algorithm for structural image editing. ACM Transactions on Graphics, 2009, 28(3): 24
- [3] Setlur V, Takagi S, Raskar R, et al. Automatic image retargeting//Proceedings of the 4th International Conference on Mobile and Ubiquitous Multimedia. New York, USA, 2005: 59-68
- [4] Wolf L, Guttmann M, Cohen-Or D. Non-homogeneous content-driven video-retargeting//Proceedings of the IEEE 11th International Conference on Computer Vision. Rio de Janeiro, Brazil, 2007: 1-6
- [5] Wang Y S, Tai C L, Sorkine O, et al. Optimized scale-andstretch for image resizing. ACM Transactions on Graphics, 2008, 27(5): 118
- [6] Hirschmüller H, Scharstein D. Evaluation of cost functions for stereo matching//Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Minneapolis, USA, 2007; 1-8

- [7] Hirschmüller H. Stereo processing by semiglobal matching and mutual information. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2008, 30(2): 328-341
- [8] Niu Y, Liu F, Feng W C, et al. Aesthetics-based stereoscopic photo cropping for heterogeneous displays. IEEE Transactions on Multimedia, 2012, 14(3): 783-796
- [9] Zhang F, Niu Y, Liu F. Making stereo photo cropping easy// Proceedings of the IEEE International Conference on Multimedia and Expo. San Jose, USA, 2013: 1-6
- [10] Utsugi K, Shibahara T, Koike T, et al. Seam carving for stereo images//Proceedings of the 3DTV-Conference: The True Vision-Capture, Transmission and Display of 3D Video (3DTV-CON). Tampere, Finland, 2010: 1-4
- [11] Yue B, Hou C, Zhou Y. Improved seam carving for stereo image resizing. EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking, 2013, 2013(1): 1-6
- [12] Wang J, Fang Y, Narwaria M, et al. Stereoscopic image retargeting based on 3D saliency detection//Proceedings of the IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP). Florence, Italy, 2014: 669-673
- [13] Basha T, Moses Y, Avidan S. Geometrically consistent stereo seam carving//Proceedings of the IEEE International Conference on Computer Vision. Barcelona, Spain, 2011: 1816-1823
- Basha T D, Moses Y, Avidan S. Stereo seam carving a geometrically consistent approach. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2013, 35(10); 2513-2525
- [15] Chang C H, Liang C K, Chuang Y Y. Content-aware display adaptation and interactive editing for stereoscopic images. IEEE Transactions on Multimedia, 2011, 13(4): 589-601
- [16] Cho S H, Kang HB. A new visual comfort-based stereoscopic image retargeting method//Bebis G, et al, eds. Advances in Visual Computing. Berlin, Germany: Springer, 2013: 290-300
- [17] Lee K Y, Chung C D, Chuang Y Y. Scene warping: Layerbased stereoscopic image resizing//Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Providence, USA, 2012: 49-56
- [18] Lin S S, Lin C H, Chang S H, et al. Object-coherence warping for stereoscopic image retargeting. IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology, 2014, 24(5): 759-768
- [19] Li B, Duan L, Lin C W, et al. Region-based depth-preserving stereoscopic image retargeting//Proceedings of the IEEE International Conference on Image Processing (ICIP). Paris, France, 2014: 2903-2907
- [20] Liu Y, Sun L, Yang S. Disparity-constrained resolution adaptation for stereoscopic images//Huet B, et al. eds. Advances in Multimedia Information Processing—PCM 2013. Switzerland: Springer, 2013: 13-24

- [21] Li K, Gong Y, Li Q, et al. A content-aware scaling method for stereoscopic images//Proceedings of the 5th International Conference on Digital Home. Guangzhou, China, 2014: 95-100
- [22] Yoo J W, Yea S, Park I K. Content-driven retargeting of



GONG Yong-Yi, born in 1970, Ph. D., professor. His research interests include image registration, image segmentation and image/video upsampling.

GUAN Bo-Liang, born in 1991, M. S. candidate. His research interest is stereo image resizing.

Background

With the development of 3D display techniques, it is very desirable to extend these methods on stereoscopic images. However, directly applying existing monocular image scaling methods to stereoscopic images is problematic as it often introduces vertical disparities and damages the original disparity distribution. The existing stereo seam carving methods fail in 🧹 vertical direction. In this paper, we proposed an improved geometrically consistent stereo seam carving method that addresses content-aware stereo image retargeting in both vertical and horizontal directions. In our method, horizontal stereo seam lines are selected in the process of vertical retargeting, similar to those in horizontal cases. However, Basha et al.'s method is not suitable for horizontal seam selection as they might go through visual outer boundary and occluded regions, which does not specify a horizontal seam in the right image consists of a single pixel at each column. There are two key properties of our method. Firstly, we analyze the drawback of existing stereo seam carving, and then establish

stereoscopic images. IEEE Signal Processing Letters, 2013, 20(5): 519-522

[23] Bare B, Li K, Yan B, et al. Pixel fusion based stereo image retargeting//Proceedings of the IEEE International Conference on Multimedia and Expo. Turin, Italy, 2015: 1-6

ZENG Kun, born in 1978, Ph. D., associate professor. His research interest is image processing.

LI Ke-Hong, born in 1990, M.S. His research interest is stereo image resizing.

WU He-Feng, born in 1985, Ph. D., lecturer. His research interests include computer vision, image processing.

LUO Xiao-Nan, born in 1963, Ph.D., professor, Ph.D. supervisor. His research interests include computer graphics & CAD, image processing.

a novel definition of horizontal stereo seam by introducing disparity-based real projection to avoid multiple pixels in each column and virtual projection to stitch seam fragments. Secondly, based on the definition, an improved geometrically consistent stereo seam carving method is proposed, which not only maintain the effect of Basha et al.'s method in horizontal retargeting, but also achieve considerable results in vertical cases.

The work was supported by the National Natural Science Foundation of China (61370160, 61402120, 61320106008), the Guangdong Province Natural Science Foundation Project (2015A030313578, 2015A030313129, 2014A030310348), the Guangdong Scientific and Technological Plan Project (2015B010106005), the Guangdong Colleges and Universities Scientific and Technological Innovation Project (2012KJCX0048), and the Guangzhou Scientific and Technological Plan Project (2014J4100032).