

基于切缝对齐和变形校正的缝切割图像尺寸调整算法^{*}

王 勋, 苏利萍, 刘春晓, 彭浩宇

(浙江工商大学 计算机与信息工程学院, 浙江 杭州 310018)

通讯作者: 刘春晓, E-mail: cxliu@mail.zjgsu.edu.cn

摘 要: 针对图像尺寸调整的缝切割方法中存在的结构断裂和变形扭曲等问题, 提出了一种基于切缝对齐和变形校正的切缝优化算法以获得更好的图像尺寸缩放效果. 算法首先利用基于图割的切缝优化方法获得当前需要移除的一条切缝, 然后采取动态规划算法, 由粗到细地优化得到切缝上下像素之间的高精度匹配对应关系, 最后通过逆向映射来对图像进行变形以校正发生扭曲甚至断裂的结构信息. 实验结果表明, 该方法能够很好地弥补缝切割所产生的扭曲变形, 达到结构连续的视觉效果. 基于切缝对齐和变形校正的切缝优化算法可用于调整图像尺寸使之与相应的显示设备相符, 具有巨大的应用潜力.

关键词: 变形; 泊松方程; 逆向映射; 图像尺寸调整; 特征匹配

中文引用格式: 王勋, 苏利萍, 刘春晓, 彭浩宇. 基于切缝对齐和变形校正的缝切割图像尺寸调整算法. 软件学报, 2014, 25(Suppl. (2)): 290-297. <http://www.jos.org.cn/1000-9825/14046.htm>

英文引用格式: Wang X, Su LP, Liu CX, Peng HY. Alignment and deformation based seam carving algorithm for image resizing. Ruan Jian Xue Bao/Journal of Software, 2014, 25(Suppl. (2)): 290-297 (in Chinese). <http://www.jos.org.cn/1000-9825/14046.htm>

Alignment and Deformation Based Seam Carving Algorithm for Image Resizing

WANG Xun, SU Li-Ping, LIU Chun-Xiao, PENG Hao-Yu

(School of Computer Science & Information Engineering, Zhejiang Gongshang University, Hangzhou 310018, China)

Corresponding author: LIU Chun-Xiao, E-mail: cxliu@mail.zjgsu.edu.cn

Abstract: In order to solve the problem that seam carving usually damages the local structure of image, this paper presents a novel method for content-aware image resizing based on alignment and deformation. First, seam carving is used to remove a seam from the input image and segment it into two parts. Second, all pixels are robustly detected and aligned along the seam and the smaller parts. Third, these sparse deformation cues are then propagated robustly and smoothly into the interior of the target image by solving the associated Poisson equations in the image domain. Experimental results show that the presented algorithm can achieve structure continuous effect versus seam carving and can be used to adjust the image size in different display device.

Key words: deformation; Poisson equation; inverse mapping; image resizing; feature matching

随着多媒体技术和视频成像技术的快速发展, 出现越来越多的图像显示设备, 如手机、电视、平板电脑、笔记本电脑等. 图像显示设备的发展有利于我们更好地共享和交换信息, 但也使潜在的问题越发地凸显出来. 不同的显示设备有不同的分辨率, 一幅图像有固定分辨率, 如果一幅图像的分辨率不同于当前的显示设备, 就应该增加或减少图像内容来适应设备, 改变图像尺寸的过程称为图像缩放.

传统的图像尺寸调整方法有裁剪和缩放, 裁剪是完全删除图像的某些对象, 而缩放同时减少图像中所有对

^{*} 基金项目: 国家自然科学基金(61003188, 61379075, 61170098); 国家科技支撑计划(2014BAK14B01); 浙江省自然科学基金(LY14F020004, Z1101243); 浙江省重点科技创新团队项目(2012R10041-15); 浙江工商大学青年人才基金(QZ13-9); 北京航空航天大学虚拟现实技术与系统国家重点实验室开放基金(BUAA-VR-13KF-2013-3); 浙江省电子商务与物流信息技术重点实验室开放基金(2011E10005); 浙江工商大学研究生科技创新项目(1120XJ1513171); 浙江省新苗人才计划(3070JQ4213062P)

收稿时间: 2014-05-09; 定稿时间: 2014-08-19

象的信息,没有考虑对象的重要性.传统的方法容易造成图像有不协调的纵横比,或失去图像中有重要信息的对象.近几年,出现了很多基于图像内容的图像缩放方法,这些方法允许图像在尺寸调整的同时没有扭曲变形或损失重要对象.这些基于图像内容的图像缩放方法可以分为缝切割图像缩放方法^[1-6]和基于变形的图像缩放方法^[9-16]两大类.

本文提出了基于切缝对齐和变形校正的切缝优化算法.首先用缝切割方法对输入图像进行切缝优化,得到尺寸调整后的两幅子图像.然后将裂缝和被优化的切缝进行特征点匹配.Jia 等人^[7]的特征匹配方法是为特征明显点,如边缘点找到匹配点,再通过求解泊松方程得到特征较弱的点的匹配.Lasram 等人^[8]的特征匹配方法是为每个点都找到匹配点,并且允许不同点匹配到同一点.在本文的方法中,要为每个点都找到相应的匹配点,并保证每个点的匹配点都不一样.于是我们提出由粗到细的四步匹配方法,从像素级匹配慢慢精细到亚像素级匹配,这样不仅能匹配边缘点等特征明显的点,而且为特征不明显的点找到亚像素级匹配,提高特征匹配的精确度.最后根据逆向映射原理,求解泊松方程得到目标区域上的偏移矢量,再用双线性插值方法重构得到目标图像.

本文的主要贡献如下:

- (1) 提出基于特征对齐和变形的缝切割方法的图像缩放方法,能够很好地解决缝切割产生的结构断裂和变形扭曲的现象.
- (2) 提出了由粗到细的四步特征匹配方法,实验结果表明多得到的匹配精度高且准确.

缝切割图像缩放方法^[1-6,19]是通过最小化能量函数得到一条切缝,将这条切缝插入原图中,图像放大,在原图中删除这条切缝,图像缩小.Avidan 等人^[1]最先提出缝切割的概念,他们通过输入图像的梯度来建立权重图,再最小化能量函数得到切缝.根据梯度权重图生成的切缝在梯度小信息量少的地方,一般都能得到较好的结果,但对于背景复杂的图像,它可能会导致扭曲或移除重要对象现象的发生.Avidan 等人^[1]根据原图建立权重图,这样做忽略了切缝对权重图的影响,为此,Rubinstein 等人^[2]提出了在每次缝切割后都重新建立权重图来计算切缝.以上两种方法是根据梯度来建立权重图,有些方法根据其他因素来建立权重图,比如 Han 等人^[3]结合小波系数和梯度来建立权重图,Cho 等人^[4]把相邻像素的重要性加入能量权重图中.Kumar 等人^[5]在实现缝切割时主要考虑保持边缘和减少人为处理痕迹,Basha 等人^[6]在求切缝时考虑遮挡点和被遮挡点的关系.这些改进的缝切割方法比 Avidan 等人^[1]的缝切割效果有所改进,但是他们都只改变切缝的位置,不能彻底解决结构断裂和变形扭曲的问题.

基于变形的图像缩放方法^[9-16,20]是通过让特征显著区域发生微小变形,其他区域发生较大变形的方式来实现图像缩放.Wolf 等人^[9]根据局部显著性、运动检测和对象检测来区别重要区域和非重要区域.Zhang 等人^[10]为图像重要区域和边缘定义了句柄,用句柄来控制它们产生相似的几何变化.Guo 等人^[11]根据显著性特征将图像网格化,将图像缩放问题转化为网格缩放问题.Wang 等人^[12]采用将扭曲断裂向不同方向扩散的缩放变形方法.Lin 等人^[13]提出基于块的变形方法来保持显著性对象和结构边缘.Liang 等人^[14]提出分片缩放的方法,根据图像边缘和显著性特征将图像分为特征显著区域和非显著区域.相比于其他图像缩放方法,基于变形的图像缩放方法能够更好地保持图像连续性,但是它们也存在缺陷,或计算复杂,或需要用户交互,不适用于移动设备.除了单种操作的图像缩放方法,还有综合性的图像缩放方法,比如 Rubinstein 等人^[17]提出结合多种操作的图像缩放方法,Wang 等人^[18]提出结合图像裁剪和变形的方法来实现图像缩放.

目前的图像缩放方法都不能解决图像与显示设备尺寸大小不匹配的问题,缝切割图像缩放方法存在结构断裂问题,其他缩放方法需要较多的人工操作,不能满足智能缩放的要求.为了解决以上问题,本文提出基于切缝对齐和变形校正的切缝优化算法.

1 基于切缝对齐和变形校正的缝切割图像尺寸调整算法

基于切缝对齐和变形校正的切缝优化算法的算法流程图如图 1 所示,主要分为切缝优化、切缝对齐和变形校正这 3 个步骤.首先用缝切割方法对输入图像 I 进行切缝优化,得到尺寸调整后的子图像 I_1 和 I_2 ,假设 I_1 比 I_2 小;然后将 I_1 的裂缝和被优化的切缝进行对齐,给切缝上的每个点都在 I_1 的裂缝上找个匹配点,得到 x 和 y 方向

的偏移量;最后根据逆向映射原理,求解泊松方程得到 I_1 上的偏移量,再用双线性插值方法重构 I_1 得到 I'_1 ,拼接 I'_1 和 I_2 ,即得到经过切缝对齐和变形校正后的 I' .

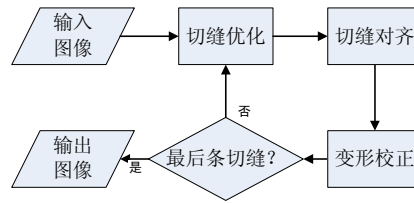


图1 算法流程图

1.1 基于图割的切缝优化

缝切割是通过在图像的不同部位移除或插入“不重要的像素点”来改变图像的尺寸.像素的重要性是由梯度决定,梯度值越大的像素越重要.切缝优化方法是先计算图像 I 中每个像素的梯度,再用动态规划找到求得一条代价最小的最优切缝 s . s 是一个八连通通路,对水平切缝每行有且仅有一个像素,对竖直切缝每列有且仅有一个像素.

我们以求解竖直切缝为例,对于一幅大小为 $n \times m$ 的图像 I ,定义切缝 s 的能量函数为

$$E(s) = \sum_{i=1}^n e(I(s_i)) \quad (1)$$

式中, $e(I) = \left| \frac{\partial}{\partial x} I + \frac{\partial}{\partial y} I \right|$ 用于求解像素梯度, $I(s_i) = I(x(i), i)$ 表示第 i 行的像素集合,即 $E(s)$ 记录图像 I 中每个像素的梯度.用动态规划方法计算最优竖直切缝,设矩阵 M 存储当前图像的累积最小能量,则 M 的定义为

$$M(i, j) = e(i, j) + \min(M(i-1, j-1), M(i-1, j), M(i-1, j+1)) \quad (2)$$

图像 I 被切缝 s 分割成两幅子图像 I_1 和 I_2 ,假设 I_1 比 I_2 小,切缝 s 的信息存储在数组 C 中, I_1 和 I_2 的切割边缘 s_1 和 s_2 的信息分别存储在数组 C_1 和 C_2 中,则 s 是图像 I 中 $(C[y], y)$ ($y=1, 2, \dots, n$) 的集合.

1.2 由粗到细的切缝对齐算法

在 Jia 等人^[7]的特征点匹配方法中,只匹配切缝上梯度较大的点就能得到良好的变形效果.在我们的实例中,若采用他们的方法,会在变形阶段出现变形重叠和空白缝隙等情况.所以我们要求切缝 s 上的每个点都有匹配点,这样 I_1 和 I_2 才会严格对应.考虑到特征明显的点匹配的好坏直接影响变形结果,像素级匹配精度为了得到更精确的匹配,我们采用由粗到细的四步特征匹配方法.第 1 步和第 2 步为像素级匹配,用严格的能量约束优先匹配边缘点等特征明显的点,为整体匹配建立正确的基础.第 3 步和第 4 步为亚像素级匹配,用较弱的能量约束为特征不明显的点找到亚像素级匹配,提高特征匹配的精确度.

1.2.1 像素级切缝对齐

用基于梯度和颜色信息的能量函数计算 s 和 s_1 上任意两点间的匹配度,由于特征明显的点匹配的好坏直接影响变形结果,我们给出能量函数兼顾梯度和颜色信息,这样会让边缘点等关键点得到唯一的匹配.公式(3)为计算两点之间匹配度的能量函数:

$$M(te, ts) = \frac{\sum_{p \in N_{te}, q \in N_{ts}} \|E(p) - E(q)\|^2}{\eta + \sum_{p \in N_{te}} \|E(te) - E(p)\|^2 + \sum_{q \in N_{ts}} \|E(ts) - E(q)\|^2} \quad (3)$$

式中, te 表示 s 上的点, ts 表示 s_1 上的点. E 是包含当前点的 RGB 三通道颜色以及它们在 x 和 y 方向上的梯度,即 $E = (R, G, B, \nabla R_x, \nabla R_y, \nabla G_x, \nabla G_y, \nabla B_x, \nabla B_y)$. $p \in N_{te}$, $q \in N_{ts}$ 表示 te 和 ts 的 8 邻域像素集合, η 为一个正数. $D_1[y]$ ($y=1, 2, \dots, n$) 表示 s_1 上的 $C_1[D_1[y]]$ 点与 s 上的 $C[y]$ 点匹配,考虑到少一条切缝不会对图像 I 造成很大的断裂,本文对所有点的匹配范围作以下限定:

- (1) $D_1[y] - D_1[y-1] \leq 2$;
 (2) $D_1[y] - y \leq 1$.

用动态规划的方法求出最优匹配 D_1 , 令 $T[y, i]$ 表示 $D_1[y] = i$ 时的最优代价, 则 $T[y, i]$ 的定义如下:

$$T[y, i] = \min_{j=i-2, i} (T[y-1, j]) + M(y, i) \quad (4)$$

D_1 中存在多对一的点, 即 $D_1[i] = D_1[i-1]$ 的情况, 存在多对一的点都是特征不明显的点, 而我们在第 1 步进行了特征明显的匹配, 于是去除了 s 到 s_1 多对一的匹配, 令 $D_1[i] = D_1[i-1] = 0$, $D[i] = 0$ 表示 i 点无相应的匹配点.

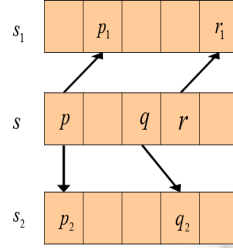


图 2 双向动态规划示意图

为了得到更可靠的匹配, 我们采用双向动态规划匹配的方法. 双向动态规划在匹配 s 和 s_1 的同时, 考虑了 s 和 s_2 的匹配的影响, 若当前点与 s_2 上的也有匹配点, 说明该点的特征明显, 这样做的好处是不仅保留特征最显著的匹配, 而且使 s_1 和 s_2 有一个间接的对应关系, 在拼接时更连续. 用与求 D_1 同样的方法可得到 s 和 s_2 的匹配结果 D_2 . 比较 D_1 和 D_2 , 若 $D_1[i] \neq 0$ 且 $D_2[i] \neq 0$, 则 $D[i] = D_1[i]$, 否则 $D[i] = 0$, D 中非零的匹配就是 s 与 s_1 之间的像素级匹配, 如图 2 所示. 图中 s 上的 p 点匹配 s_1 上的 p_1 点, 即 $D_1[p] = p_1$, 同理得, $D_2[p] = p_2$, p 点在 s_1 和 s_2 上都有匹配点, 令 $D[p] = p_1$. 反观 q 和 r , $D_1[q] = 0$, $D_2[q] = q_2$, $D_1[r] = r_1$, $D_2[r] = 0$, 它们中有一方没有匹配点, 则令 $D[q] = 0$, $D[r] = 0$.

经过双向动态规划匹配后, 得到的匹配都是特征明显的关键点, 由于交叉匹配会导致变形断裂, 于是我们根据第 1 步所得的匹配结果将 s 和 s_1 进行分段匹配. 分段匹配方法既避免了交叉匹配, 又很好地利用了关键点的匹配结果. 分段方法如图 3 所示, 其中 p 和 p_1 , q 和 q_1 , r 和 r_1 是第 1 步已匹配的点, 我们将 p 和 q 之间的像素与 p_1 和 q_1 之间的像素进行匹配, q 和 r 之间的像素与 q_1 和 r_1 之间的像素进行匹配.

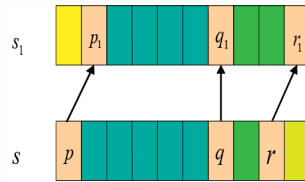


图 3 分段匹配示意图

由于当前未匹配的都是梯度较小的点, 我们就只考虑颜色信息的能量函数, 具体如下:

$$M(te, ts) = \sum_{p \in N(te), q \in N(ts) \setminus \{p, q\}} \alpha \|E(p) - E(q)\| \quad (5)$$

式中, te 表示 s 上的点, ts 表示 s_1 上的点, $p \in N(te)$, $q \in N(ts)$ 表示 te 和 ts 的 8 邻域像素集合, $E = (R, G, B)$,

$$\alpha = \begin{bmatrix} 2 & 4 & 2 \\ 4 & 8 & 4 \\ 2 & 4 & 2 \end{bmatrix}$$

1.2.2 亚像素级切缝对齐

经过像素级匹配, 切缝上大部分的点都已匹配, 但还是有少数特征极不明显的点未匹配, 这说明它们没有很合适的像素级匹配点, 需要给它们找到亚像素级的匹配点. 我们采用二等分插值像素的方法生成亚像素, 如图 4 所示, 其中 p 和 p_1 , q 和 q_1 是已匹配的点, s 和 s_1 上分别有 m 和 n 个点未匹配, 在 p_1 和 q_1 之间进行二等分插值生

成新的像素,直至 $n' \geq 2 \times m$, n' 为 s_1 上插值后的点数总和.

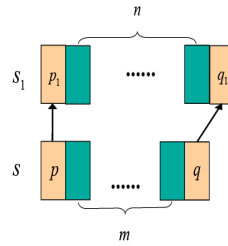


图4 二等分插值像素示意图

对于特征不明显的点,变化不会太大,所以我们考虑像素颜色和坐标的能量函数.

$$M(te, ts) = \|E(te) - E(ts)\| \quad (6)$$

式中, te 表示 s 上的点, ts 表示 s_1 上的点, $E = (R, G, B, x, y)$, x 和 y 为当前点的坐标. 根据数组 C 从小到大的匹配的原则, 选择在匹配范围内差异最小的像素作为匹配点.

D 对切缝上的每个点都有匹配, 但是像素级匹配还有改进空间, 可以找到最优的亚像素级匹配. 如图 5 所示, p, q, r 是像素级匹配, k 和 s 为亚像素级匹配, 对每个像素级匹配的点在匹配范围内以 0.1 为界等分, 找到最优匹配.

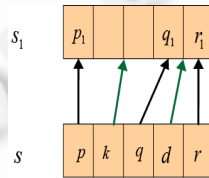


图5 亚像素级匹配示意图

$$M(te, ts) = \|E(te) - E(ts)\| \quad (7)$$

式中, te 表示 s 上的点, ts 表示 s_1 上的点, $E = (R, G, B)$. 根据公式(7)来计算 s 上的第 $C[i]$ 点与该等分点之间颜色的相似度, 找到与之最相似的点作为匹配点.

1.3 基于变形的结构校正方法

根据 s 和 s_1 的切缝对齐结果 D , 可以计算 s 到 s_1 的偏移量, 即 $x' = x_1 - x_2$, $y' = y_1 - y_2$, 其中, $x_1 = D[x]$, $y_1 = C[D[x]]$, $x_2 = x$, $y_2 = C[x]$. 若 x 非整数, 则通过插值得到坐标. 变形的方向如图 6 所示, 令 I_1 上 s_1 以外的边缘偏移量为 0, 根据逆向映射原理和切缝 s 上的偏移量可求出区域 I_1 上的偏移量.

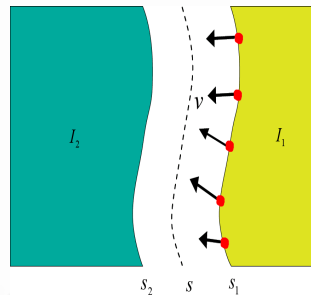


图6 变形示意图

为了得到整个区域的偏移量, 我们使用公式(8).

$$\min \sum_{p \in \Omega, q \in N_p \cap \partial \Omega} (f_p - f_q)^2 \quad (8)$$

其中, f_p 是变形区域的 p 点的偏移量, f_q 是 f_p 的 4 邻域的偏移量集合, Ω 为变形区域. 对公式(8)求导等于 0, 得到公

式(9).

$$|N_p|f_p - \sum_{q \in N_p \cap \partial\Omega} f_q = \sum_{q \in N_p \cap \partial\Omega} f_q^* \quad (9)$$

其中, f_q^* 为 f_p 已知领域的偏移量, $|N_p|$ 为 f_p 的未知领域个数且 $|N_p| \leq 4$. 对公式(9)求解泊松方程, 得到整个变形区域的偏移量. 根据变形区域的偏移量采用双三次内插值得到变形结果 I'_1 , 拼接 I'_1 和 I_2 得到 I' .

2 实验结果及讨论

我们在一台配置为 AMD2.6G 双核 CPU, 2GB 内存, 安装了 Windows XP 操作系统的台式机上, 使用 MATLAB 2012a 开发平台实现了本文提出的基于切缝对齐和变形校正的缝切割图像调整方法.

图 7 给出了 4 个横向切缝比较实例, 从左到右依次是输入图像, 缝切割处理结果, Rubinstein 等人的处理结果和我们的处理结果.

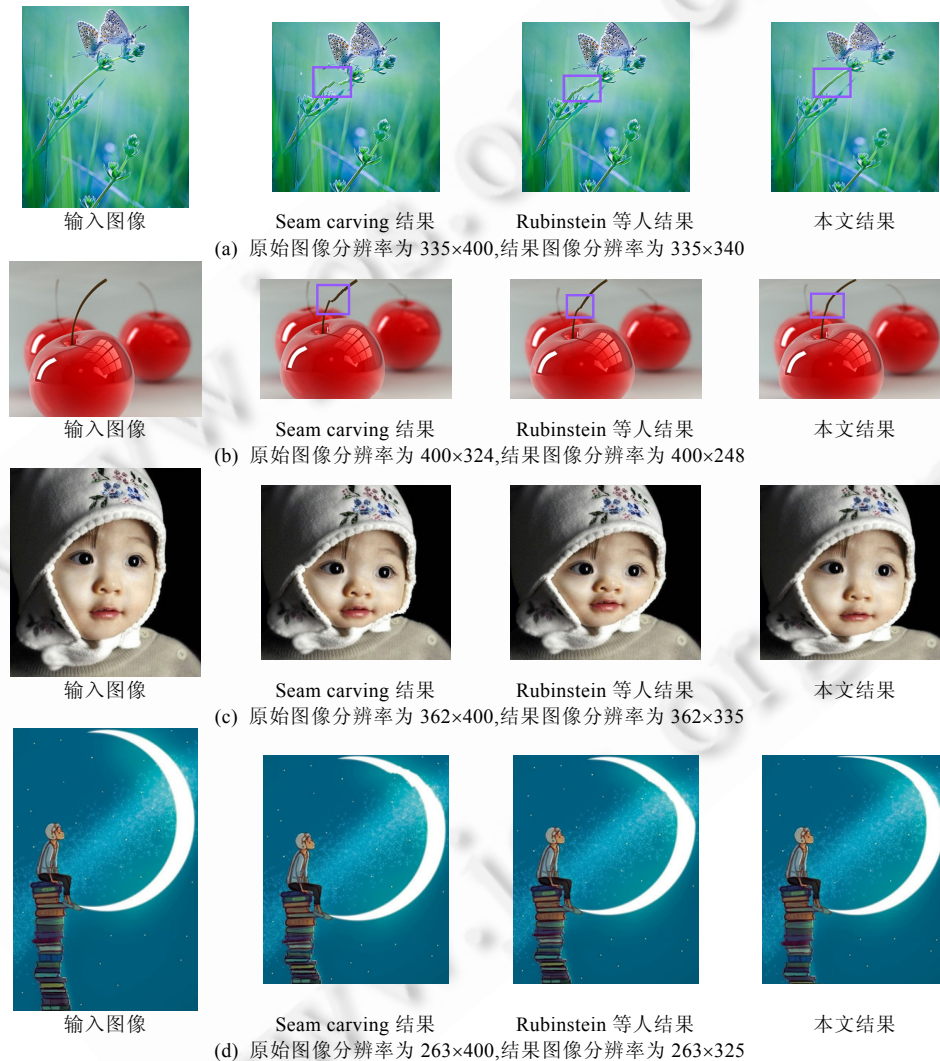


图 7 横向切缝对比

在图 7(a)和图 7(b)所示的加方框区域为植物的茎, 缝切割的茎发生很大断裂, Rubinstein 等人的结果与缝切

割相比有所改进,在本文实验给出的结果中,我们保持了植物茎的连续.观察图 7(c)和图 7(d)可知,缝切割处理结果中,月亮弧度发生严重的边缘扭曲,小孩的脸发生断裂和比例失调.Rubinstein 等人的处理结果中,月亮弧度扭曲减小,小孩脸部虽依旧比例失调但没有出现断裂边缘.而在我们的处理结果中,不仅消除了月亮的扭曲弧度和断裂边缘,还保持了小孩的脸部比例结构.

图 8 给出了 3 个纵向切缝比较实例,从左到右依次是输入图像,缝切割处理结果,Rubinstein 等人的处理结果和我们的处理结果.在图 8(a)中,缝切割处理结果的人腿没有保持比例,修剪过细,显得不正常,Rubinstein 等人处理的人腿稍微粗了一些,但是还是不能保持原图的比例结构.在我们的实验结果中,较好地保持了两条腿的比例,显得自然.在图 8(b)和图 8(c)中,缝切割和 Rubinstein 等人的处理结果都不能保持边缘和结构,笑脸没有保持圆形,花的茎发生断裂,我们的结果能消除这些问题,达到美观的缩放效果.

综上所述,缝切割图像缩放方法的处理结果会发生严重的结构扭曲和边缘断裂,Rubinstein 等人改进的缝切割图像缩放方法虽然比缝切割方法的效果有所改进,但是仍然存在一定的扭曲变形和断裂.基于切缝对齐和变形校正的缝切割图像尺寸调整算法不仅能消除缝切割产生的变形扭曲,还能保持图像边缘.



图 8 纵向切缝对比

3 结论

根据缝切割图像缩放方法所产生的扭曲变形和结构断裂的问题,提出了一种基于切缝对齐和变形校正的切缝优化算法,在缝切割之后对面积小的部分进行特征匹配和变形校正,从而保证被分割的两部分结构连续.本文还首次提出了由粗到细的四步特征匹配方法,改进了传统特征匹配方法的精度和准确度.本文的方法也存在缺陷,对于极少部分图像,会产生模糊的结果.

References:

- [1] Avidan S, Shamir A. Seam carving for content-aware image resizing. ACM Trans. on Graphics, 2007,26(3):Article 10,1-10.
- [2] Rubinstein M, Shamir A, Avidan S. Improved seam carving for video retargeting. ACM Trans. on Graphics, 2008,27(3):Article 16,1-9.

- [3] Han JW, Choi KS, Wang TS, Cheon SH, Ko SJ. Improved seam carving using a modified energy function based on wavelet decomposition. In: Uemura W, ed. Proc. of the IEEE Int'l Symp. on Consumer Electronics. Kyoto: IEEE, 2009. 38–41.
- [4] Cho S, Choi H, Matsushita Y, Lee S. Image retargeting using importance diffusion. In: Proc. of the Int'l Conf. on Image Processing. Cairo: IEEE, 2009. 977–980.
- [5] Kumar M, Conger DD, Miller RL, Luo J, Radha H. A distortion-sensitive seam carving algorithm for content-aware image resizing. Journal of Signal Processing Systems, 2011,65(2):159–169.
- [6] Basha T, Moses Y, Avidan S. Geometrically consistent stereo seam carving. In: Metaxas DN, ed. Proc. of the IEEE Int'l Conf. on Computer Vision. Barcelona: IEEE, 2011. 1816–1823.
- [7] Jia JY, Tang CK. Image stitching using structure deformation. IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2008, 30(4):617–631.
- [8] Lasram A, Lefebvre S. Parallel patch-based texture synthesis. In: Dachsbacher C, ed. Proc. of the Eurographics Conf. on High Performance Graphics. Paris, 2012. 115–124.
- [9] Wolf L, Guttman M, Cohen-Or D. Non-Homogeneous content-driven video retargeting. In: Lew MS, ed. Proc. of the IEEE Int'l Conf. on Computer Vision. Rio de Janeiro: IEEE, 2007. 1–6.
- [10] Zhang GX, Cheng MM, Hu SM, Martin RR. A shape-preserving approach to image resizing. Computer Graphics Forum, 2009, 28(7):1897–1906.
- [11] Guo Y, Liu F, Shi J, Zhou ZH, Gleicher M. Image retargeting using mesh parametrization. IEEE Trans. on Multimedia, 2009, 11(5):856–867.
- [12] Wang YS, Tai CL, Sorkine O, Lee TY. Optimized scale-and-stretch for image resizing. ACM Trans. on Graphics, 2008, 27(5):Article 118, 1–8.
- [13] Lin S, Yeh I, Lin C, LEE T. Patch-Based image warping for content-aware retargeting. IEEE Trans. on Multimedia, 2013, 15(2):359–368.
- [14] Liang Y, Su Z, Luo XN. Patchwise scaling method for content-Aware image resizing. Signal Processing, 2012,92(5):1243–1257.
- [15] Rubinstein M, Gutierrez D, Sorkine O, Shamir A. A comparative study of image retargeting. ACM Trans. on Graphics, 2010, 29(6):Article 160, 1–10.
- [16] Setlur V, Takagi S, Raskare R, Gleicher M, Gooch B. Automatic image retargeting. In: Laycock SD, ed. Proc. of the Int'l Conf. on Computer Graphics and Interactive Techniques. Los Angeles: ACM, 2005. 59–68.
- [17] Rubinstein M, Shamir A, Avidan S. Multi-Operator media retargeting. ACM Trans. on Graphics, 2009,28(3):Article 23, 1–11.
- [18] Wang YS, Lin HC, Sorkine O, Lee TY. Motion-Based video retargeting with optimized crop and warp. ACM Trans. on Graphics, 2010,29(4):Article 90, 1–9.
- [19] 聂栋栋,马利庄.改进的图像缝雕刻算法.计算机辅助设计与图形学学报,2011,23(11):1890–1895.
- [20] 施美玲,徐丹.主体大小能控的内容感知图像缩放.计算机辅助设计与图形学学报,2011,23(4):915–922.



王勋(1967—),男,浙江平阳人,博士,教授,CCF 高级会员,主要研究领域为计算机图形学,图像视频处理,智能信息处理,可视化。

E-mail: wx@zjgsu.edu.cn



苏利萍(1989—),女,硕士,主要研究领域为图像视频的编辑与处理技术。

E-mail: suliping0716@126.com



刘春晓(1979—),男,博士,副教授,主要研究领域为图像视频处理,模式识别与智能系统,计算机图形学,计算机视觉。

E-mail: cxliu@mail.zjgsu.edu.cn



彭浩宇(1978—),男,博士,副教授,CCF 会员,主要研究领域为计算机图形学,计算机视觉,视频图像分析与理解。

E-mail: hypeng@mail.zjgsu.edu.cn