

利用大位移视图修复单幅图像的 透视畸变优化算法

刘春晓,彭群生,杨颖振,王进,陈为

(浙江大学CAD&CG国家重点实验室,浙江杭州310058)

摘要: 本文提出一个利用大位移视图可靠地恢复目标图像上含有复杂结构信息的较大信息丢失区域的图像修复新算法. 依次经过基于单应矩阵的大位移视图变形、基于能量优化的重叠像素对应和基于能量优化的丢失像素估计三个步骤,一个由粗到细的畸变校正算法对大位移视图图像进行透视畸变校正后再用来补全目标图像上的受损区域. 最后,我们采用泊松图像融合算法消除修复区域与其周围像素之间存在的鬼影现象,获得无缝的修复效果. 实验证明本文方法优于已有的图像修复算法.

关键词: 图像修复; 大位移视图; 透视畸变; 能量优化

中图分类号: TP391 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2009) 4A-0112-06

Optimization of Perspective Distortion for Image Completion Based on the Large Displacement View

LIU Chun-xiao, PENG Qun-sheng, YANG Ying-zhen, WANG Jin, CHEN Wei

(State Key Laboratory of CAD&CG, Zhejiang University, Hangzhou, Zhejiang 310058, China)

Abstract: We present a new image completion method based on a large displacement view (LDV) for faithfully repairing large missing regions on the target image with complex structure information. A coarse-to-fine distortion correction algorithm is proposed to minimize the perspective distortion in the LDV image, which performs following three steps in order, i. e. homography based LDV warping, energy optimization of overlap correspondences and energy optimization for hole filling. Then, the rectified LDV image is used to restore the missing pixels. We finally eliminate the ghost effect between the repaired region and its surroundings by Poisson image blending. Experiments show that our method outperforms recent state-of-the-art image completion methods.

Key words: image completion; large displacement view; perspective distortion; energy optimization

1 引言

图像修复技术是一项利用当前图像或者另一幅图像上的可见信息来填充图像上的被遮挡或受损区域,从而得到视觉上满意效果的技术. 由于在照片编辑、索具去除和特效制作等方面的广泛应用需求^[1],图像修复技术在过去的十几年中得到了很大的关注,且涌现出很多算法^[2].

传统的图像修复算法大多是针对单幅图像,且主要分为基于偏微分方程和纹理合成两种方式. 前者定义受损区域周围的已知信息像素为边界条件,将图像修复看作偏微分方程求解^[3]或变分问题^[4]. 因此,图像修复的过程转换成已知像素信息向空洞区域的扩散过程. 这类方法一般只适合于较小的结构性区域的修复,但是对于

高度纹理性的区域将失效. 将目标图像上的已知信息区域看作纹理样本,后者采用纹理合成的方法生成新的图像面片来填充信息丢失区域^[5-7]. 由于假设目标图像上的丢失像素可以在已知信息区域中找到,后者本质上是一个欠约束的病态问题^[8]. 这类方法一般对于具有显著纹理特性的区域能够产生满意的修复效果,但是很难保持较大受损区域中的结构信息. 通过用户在受损区域中指定的结构曲线^[9]或在场景中指定的射影变换关系^[10]的帮助下,基于纹理合成的交互图像修复方法取得了惊人的效果. 然而,他们对于具有复杂结构信息的自然场景需要令人厌烦的用户交互量. 总之,已有图像修复方法大多基于单幅图像,不适于修复较大的信息丢失区域,尤其是难以恢复复杂的结构信息.

针对传统图像修复方法中存在的问题,出现了少量

收稿日期:2008-08-06;修回日期:2009-02-03

基金项目:国家自然科学基金(No. 60603076, No. 60703048, No. 60833007);国家863高技术研究发展计划(No. 2007AA01Z316);国家973重点基础研究发展规划(No. 2009CB320802)

基于多幅图像,特别是大位移视点图像,进行图像修复的工作.基于图像库的方法^[11]通过检索巨大图像库中的类似照片用于空洞的修复,因此图像库的大小及其多样性成为决定修复能否成功的关键.一项与本文非常相关的工作^[12]不但受限于准平面场景,而且需要令用户感觉烦琐的交互工作进行平面场景区域的分割.

2 利用大位移视图修复单幅图像的透视畸变优化算法

本文提出一个利用大位移视图修复目标图像上较大信息丢失区域的图像修复新算法.算法的关键是如何校正大位移视图上已知公共场景区域中的透视畸变,以及如何利用校正的空洞周围已知像素来估计信息丢失的像素.为此,我们提出一个由粗到细的透视畸变校正算法,算法流程图如图 1 所示.

2.1 基于单应矩阵的大位移视图变形

为了加速算法的收敛过程,我们首先通过假设两个视图中的场景近似位于同一个三维平面上来快速得到全局较优的初始解.通过单应矩阵作用下的全局变换所获得的两视图间的重叠区域被近似当作他们的公

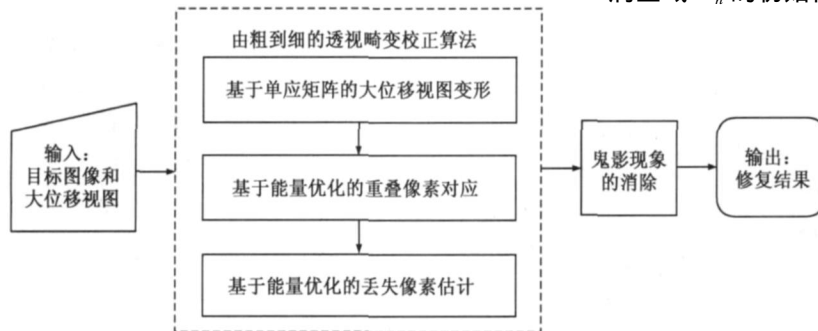


图1 算法流程图

2.2 基于能量优化的重叠像素对应

在不满足平面场景的情况下,公共场景区域 Ω_h 中会存在大量的不匹配像素,即残余畸变.因此,直接使用变形的大位移视图来填补空洞将导致非常丑陋的效果.在此,需要将空洞周围的已知公共场景区域 Ω_h 作为对丢失信息像素的初始估计进行校正的约束和依据,那么就必须先进一步校正 Ω_h 中的残余畸变.传统的立体匹配算法^[16]和光流算法^[17]大多只适于视点变化较小的视图间的稠密像素对应问题.通过误匹配检测机制和动态权值参数,我们将 Ω_h 中的畸变校正看作基于能量优化的像素对应问题,并提出一个新的优化策略用于产生大位移视图间的可靠像素对应.

设 (p, p') 表示目标图像 p 和 T 和大位移视图 p' 上的像素匹配点对, N_p 表示 p 在 Ω_h 中的四连通邻域, p, q 为邻域像素对 $q \in N_p$.假设整幅图像为马尔科夫随机场 (MRF), 一个像素的属性可以由它邻域像素唯一

共场景区域.全局变形的大位移视图不但提供了两视图间已知公共场景区域的初始畸变校正结果,而且提供了目标图像上丢失信息像素的初始估计.

基于单应矩阵的大位移视图变形主要包含如下三个步骤:(1)特征检测与匹配:首先采用尺度不变的特征变换 (SIFT) 检测器^[13]在两个视图上提取足够的特征点及其高维特征描述符,然后采用逼近最近邻 (ANN) 搜索算法^[14]获得两视图中检测特征点的匹配对应关系;(2)单应矩阵的求解:由于逼近最近邻方法存在不可避免的误匹配,再加上图像噪声的影响,特征匹配点集中可能存在外点.我们采用 RANSAC 算法剔除外点,Levenberg-Marquardt (LM) 算法^[15]鲁棒地估计满足 $p = Hp'$ 的单应矩阵 H ,其中 p 和 p' 分别是目标图像和大位移视图上的匹配特征点;(3)大位移视图变形:根据 H 将大位移视图 S 变换到目标图像 T 的视点下,如图 2 所示.

变形的大位移视图 S 落到目标图像 T 上产生两者的重叠区域. S 上与目标图像 T 中已知区域重叠的部分建立了已知公共场景区域 Ω_h 的初始像素对应. S 上与目标图像 T 中丢失信息区域重叠的部分提供了对空洞区域 Ω_h 的初始估计.

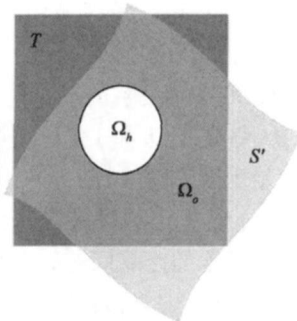


图2 大位移视图变形示意图

决定.在对应像素的颜色恒常性和邻域像素的位移场光滑性约束下,我们定义能量函数为

$$E = \sum_p E_c(p) + \sum_{p,q} E_s(p, q)$$

其中 $E_c(p)$ 为颜色恒常项, $E_s(p, q)$ 为位移场光滑项.是一个平衡 $E_c(p)$ 和 $E_s(p, q)$ 的动态权值参数.颜色恒常项用于确保大位移视图中像素颜色值 C_p 与目标图像中对应像素颜色值 C_p 的一致性,即 $E_c(p) = (C_p - C_p)^2$.位移场光滑项用于惩罚相邻像素 p 和 q 之间不一致的位移变化.考虑到对不连续运动边界的强烈抑制会造成过渡光滑的位移场,我们设计的位移场光滑项松弛了对较大位移变化的惩罚力度,即

$$E_s(p, q) = (p - q),$$

$$(x) = \begin{cases} x^2, & |x| \leq 1; \\ 2|x| - 1, & |x| > 1. \end{cases}$$

重叠像素对应的详细优化过程如下:

(1) 初始化. 使用单应矩阵的逆矩阵 H^{-1} 来初始化 p , 即 $p \sim H^{-1}p, \forall p \in \phi$; 动态权值的初始值取 ϕ .

(2) 能量函数最小化. 使用共轭梯度法最小化能量函数获得 $p, \forall p \in \phi$.

(3) 误匹配检测. 如果 $DisplaceTerm(p) > d_t$ && $(ColorSimilarity(p) > c_s \ \&\& \ ColorDiffer(p) > c_d)$, 将 p 放入误匹配像素集 M_m ; 否则, 将 p 放入匹配像素集 M_g .

(4) 优化循环. 对 $\forall p \in M_m$, 增加 ϕ 的值, 重复步骤 (2) 和 (3); 如果 p 不满足误匹配条件, 将其从 M_m 移至 M_g .

(5) 结束条件. 如果 $M_m = \phi$ 或在上一个优化循环中没有像素从 M_m 中移除, 退出.

我们设计了像素误匹配检测规则来发现那些由于遮挡或自遮挡引起的迷失像素. 特别地, $DisplaceTerm(p)$ 表示能量函数中与 p 相关的位移场光滑项的值. $ColorSimilarity(p)$ 表示目标图像上像素 p 和大位移视图上的对应像素 p 的八邻域对应像素之间的绝对颜色差异之和. $ColorDiffer(p)$ 为 p 与 p 的绝对颜色差异. 在经过像素对应的每个优化循环之后, 我们增大动态权值以加强位移场光滑项对那些迷失像素的约束作用.

利用已知公共场景区域中足够的可靠像素对应 $(p, p) \in M_g$, 我们使用归一化的八点法计算基础矩阵作为两视图间几何关系的一个约束. 与单应矩阵的估计类似, RANSAC 算法和 LM 算法用于剔除外点并鲁棒地估计满足极线方程 $p^T F p = 0$ 的基础矩阵 $F^{[15]}$.

2.3 基于能量优化的丢失像素估计

将空洞像素的修复问题转化为像素对应的优化问题, 即给定变形的大位移视图所提供的初始估计值, 利用空洞周围的可靠像素对应 M_g 来估计丢失信息像素 $p \in \phi$ 在大位移视图上的对应像素 p . 为了获得满意的修复效果, 必须满足三个先验期望. 首先, 根据极线几何^[15], 大位移视图上的对应像素 p 应该位于 p 的极线上, 因此 p 和 p 满足基于基础矩阵 F 的极线方程约束. 其次, 在空洞内部及其周围的位移场应该是光滑的. 最后, 在目标图像和大位移视图上 p 与 p 的局部邻域中的颜色分布应该一致.

∂_h 设表示空洞的边界, $\phi_h = \{p \in T \setminus \phi_h \mid N_p \cap \phi_h \neq \emptyset\}$ 为空洞周围位于已知公共场景区域中的像素. NB_p 是以像素 p 为中心的 3×3 图像面片. 考虑到上述先验期望, 定义恢复像素 p 的能量函数如下:

$$E(p) = cE_c(p) + eE_e(p) + sE_s(p)$$

其中 $E_c(p)$ 是颜色一致能量项, 表示为目标图像上像素 $p_i \in NB_p$ 与大位移视图上像素 $p_i \in NB_p$ 之间颜色差异的平方和; $E_e(p)$ 是极线约束能量项, 表达为 p 和 p 的极线几何误差平方和; $E_s(p)$ 为位移场平滑能量项, 表

达为 p 和 $q \in NB_p$ ($(\partial_h \cap M_g) \cap R$) 的位移向量差异的平方和, 即

$$E_c(p) = \sum_{p_i \in NB_p} (C_{p_i} - C_{p_i})^2,$$

$$E_e(p) = d^2(p, Fp) + d^2(p, F^T p),$$

$$E_s(p) = \sum_{p, q \in R(\partial_h \cap M_g) \cap R} (p - q)^2$$

$d(x, l)$ 为点 x 到直线 l 的距离, R 为空洞 ϕ_h 中已经修复的像素集合. c , e 和 s 是起平衡作用的三个权值参数.

像素修复从空洞的边缘 B_h 开始逐像素进行. 为了恢复空洞中的结构信息, 定义像素 $p \in B_h$ 的修复优先级为

$$P(p) = C(p) * D(p) * S(p)$$

其中:

$$C(p) = \sum_{q \in NB_p} cw(q) / 8,$$

$$D(p) = \sum_{r \in N_p} dw(r) / 4,$$

$$S(p) = \nabla C_p \cdot n_p / \phi.$$

颜色置信项 $C(p)$ 表示 p 的八邻域 NB_p 中可靠颜色信息的多少, $cw(q)$ 是 $q \in NB_p$ 的颜色置信权值. $D(p)$ 是位移置信项, 它表示 p 的四邻域 N_p 中可靠位移信息的多少, $dw(r)$ 是 $r \in N_p$ 的位移置信权值. 结构保持项 $S(p)$ 中 ∇C_p 代表 NB_p 中最大颜色梯度值, ∇ 是正交算子. n_p 是空洞边缘 ∂_h 上 p 的单位法向, ϕ 是归一化因子. $S(p)$ 表示图像结构与空洞边缘之间的作用强度, 它给予结构作用较强的像素以较高的优先级^[6].

基于能量优化的空洞像素估计算法伪代码如下:

(1) 初始化. 使用单应矩阵的逆矩阵 H^{-1} 来初始化 p , 即 $p \sim H^{-1}p, \forall p \in \phi_h$; 初始化 B_h 为 ∂_h .

(2) 权值设置.

颜色置信权值设置. 如果 $p_i \in \partial_h \cap R$, $cw(p_i) = 1$; 否则 $cw(p_i) = 0$.

位移置信权值设置. 如果 $p_i \in (\partial_h \cap M_g) \cap R$, $dw(p_i) = 1$; 否则 $dw(p_i) = 0$.

(3) 修复优先级计算. 对 $\forall p \in B_h$, 计算 $C(p)$ 、 $D(p)$ 和 $S(p)$.

如果 $C(p) < c \ \&\& \ D(p) < d \ \&\& \ S(p) < s$, $P(p) = 0$; 否则 $P(p) = C(p) * D(p) * S(p)$.

(4) 能量函数最小化. 对 $p_m = \arg \max_p \{P(p) > 0\}$, 通过共轭梯度法最小化能量函数 $E(p_m)$ 来获得 p_m .

(5) 像素拷贝和填充. 使用 p_m 来修复 p_m , 并设 $cw(p_m) = 0$, $dw(p_m) = 1$; 更新 B_h 和 R .

(6) 优化循环.

内层循环: 重复步骤 (4) ~ (5) 直至两个循环迭代过程中没有被修复的像素.

外层循环:重复步骤(2)~(5)直至 $B_h = \phi$.

实验中 c 和 e 的取值范围分别为 0.5~1.5 和 1~2. s 初始化为 1~2 的范围内,然后每经一个内层循环就增加 1 来增强位移场光滑能量项的约束作用.通过丢失像素估计算法,空洞中的所有像素由优化得到的大位移视图上的对应像素来补全.

2.4 鬼影现象的消除

由于目标图像与大位移视图之间存在不可避免的亮度差异,修复区域与整个目标图像之间会存在亮度不一致的现象,即鬼影.我们采用泊松图像融合技术很好地解决了这一问题^[18].设 f_q^* 是像素 q 的已知

颜色,则像素 p 的融合颜色 f_p 通过求解如下线性方程组得到

$$|N_p| f_p - \sum_{q \in N_p} f_q = \sum_{q \in N_p} f_q^* + g_{pq}$$

其中 g_{pq} 是空洞 h 中修复像素 p 和 q 的颜色差异.我们采用共轭梯度法高效求解上述大型稀疏线性方程组.

3 实验结果

本文算法在配置为 PIV1.8GHz 和 1.0GB 内存的微机上安装的 Windows XP 操作系统下以 VC++8.0 为开发平台实现.限于篇幅限制,本文给出图 3~图 5 三个实验结果.

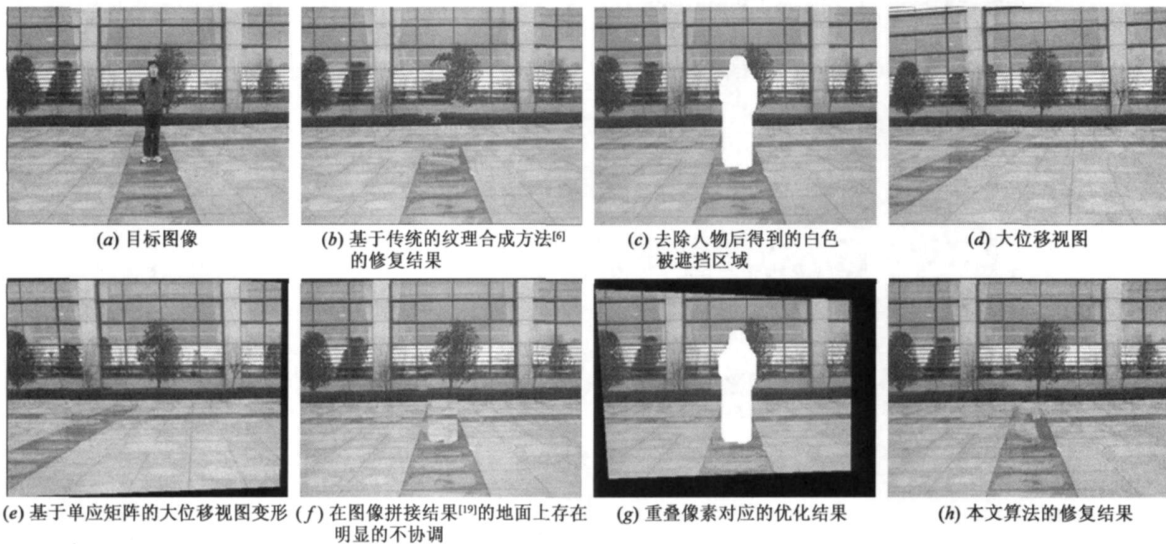


图3 人物移除实验结果

在图 3 的人物移除实验中,基于纹理合成的图像修复算法^[6]修复目标图像图 3(a)得到图 3(b),显然被遮挡区域中的树木结构等没有合理地恢复.通过引入一幅大位移视图如图 3(d),我们期望得到令人满意的修

复效果.基于单应矩阵的大位移视图变形结果见图 3(e).由于视点发生了较大的变化,图 3(e)与图 3(a)相较之下在墙壁和地面上仍然存在明显的畸变.使用图像拼接方法^[19]直接利用图 3(e)补全图 3(c)将导致较

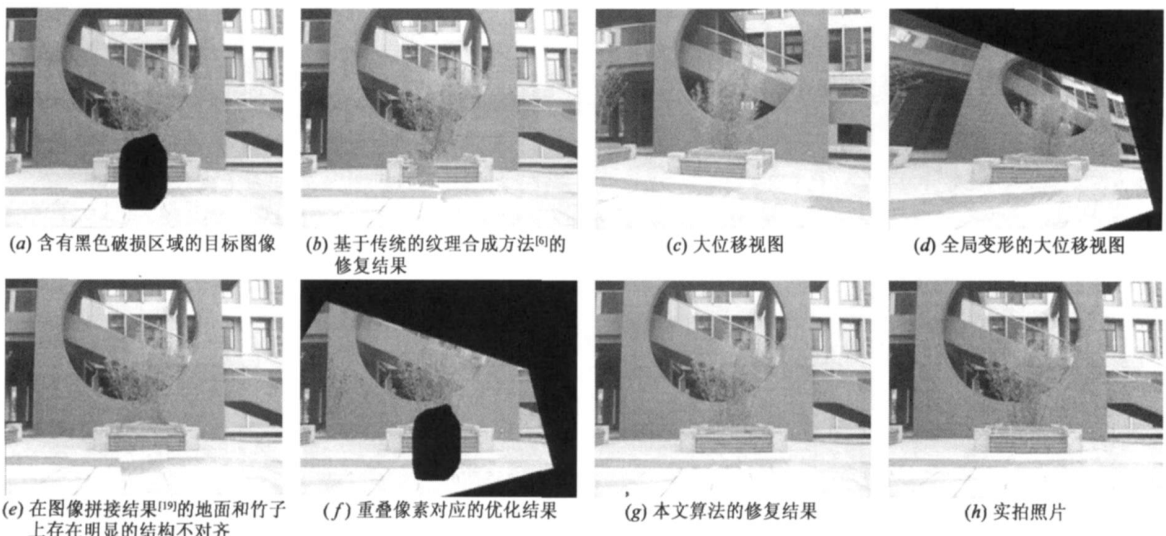


图4 办公楼一角的实验结果

差的修复结果如图 3(f)。本文算法通过能量优化进一步校正图 3(e) 和图 3(a) 之间公共场景区域中的残余透视畸变。对已知公共场景区域中像素对应的优化结果见图 3(g), 可见大位移视图中的校正结果已经与目标图像上的对应部分基本一致。最后, 在周围已知公共场景区域中可靠像素对应的约束之下, 丢失信息区域的初始估计通过能量优化得到校正。图 3(h) 是本文方法的修复结果, 它明显优于图 3(b) 和图 3(f) 中的效果。算法在小于 1 分钟的时间内修复了尺寸为的目标图像

上约 9,000 个被遮挡的像素。

图 4 显示了含有 8,863 个受损像素的图像修复实例, 修复结果图 4(g) 几乎可以跟实拍图像 4(h) 相媲美。实例图 5 是针对含有 10,170 个信息丢失像素的图 5(a)。初始修复结果图 5(g) 中呈现明显的鬼影现象。相较之下, 图 5(h) 显示了泊松图像融合的无缝修复效果。由此可见, 本文算法不但能够可靠修复含有复杂结构信息的较大受损区域, 而且能够处理两视图中存在稍微亮度差异的情况。

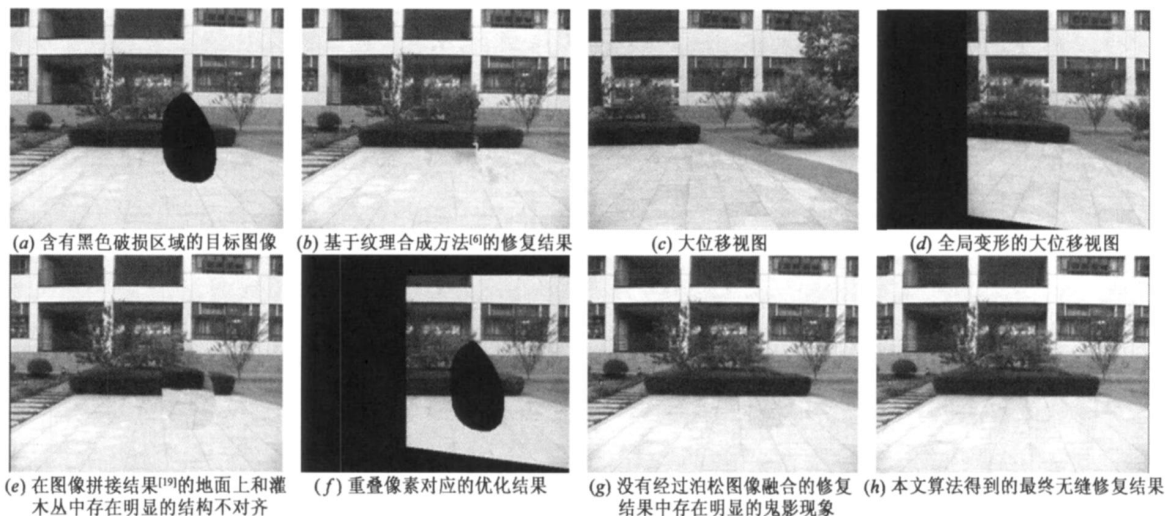


图5 公寓角落的实验结果

4 结论和展望

本文提出一个利用大位移视图补全目标图像图像修复新方法, 即由一个由粗到细的透视畸变校正算法对大位移视图优化校正后再用来恢复目标图像上的受损像素。实验结果表明, 本文算法优于传统的图像修复算法, 能够修复含有复杂结构信息的较大受损区域。目前, 我们正尝试将该方法扩展到视频的修复上。另外, 由于多视图几何能够提供更加可靠的约束信息, 基于多视图的图像修复技术也是我们正在试验的一个研究方向。

参考文献:

[1] Collis B, Kokaram A. Filling in the gaps [J]. IEE Electronics Systems and Software, 2004, 2(4): 22 - 28.
 [2] Shih T K, Chang RC. Digital inpainting-survey and multilayer image inpainting algorithms [A]. Proceedings of ICITA 2005 [C]. Sydney, Australia, 2005. 1. 15 - 24.
 [3] Bertalmio M, Sapiro G, Caselles V, Ballester C. Image inpainting [A]. Proceedings of the ACM SIGGRAPH 2000 [C]. New Orleans, Louisiana, USA, 2000. 417 - 424.
 [4] Chan T, Shen J H. Variational image inpainting [J]. Communications on pure and applied mathematics, 2005, 58(5): 579 -

619.

[5] Drori I, Cohen O D, Yeshurum H. Fragment-based image completion [J]. ACM Transactions on Graphics, 2003, 22(3): 303 - 312.
 [6] Criminisi A, Pérez P, Toyama K. Region filling and object removal by exemplar-based image inpainting [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2004, 13(9): 1200 - 1212.
 [7] Komodakis N, Tziritas G. Image completion using global optimization [A]. Proceedings of the IEEE CVPR 2006 [C]. New York, USA, 2006. 1. 442 - 452.
 [8] Shen J H. Inpainting and the fundamental problem of image processing [J]. SIAM News, 2003, 36(5): 1 - 4.
 [9] Sun J, Lu Y, Jia J Y, Shum H Y. Image completion with structure propagation [J]. ACM Transactions on Graphics, 2005, 24(3): 861 - 868.
 [10] Pavi é D, Schönfeld V, Kobbelt L. Interactive image completion with perspective correction [J]. The Visual Computer, 2006, 22(9 - 11): 671 - 681.
 [11] Hays J, Efros A A. Scene completion using millions of photographs [J]. ACM Transactions on Graphics, 2007, 26(3): 4-1 - 4-4.
 [12] Liu C X, Guo Y W, Pan L, Peng Q S, Zhang F Y. Image completion based on views of large displacement [J]. The Visual Computer, 2007, 23(9 - 11): 833 - 841.

- [13] Lowe D G. Distinctive image features from scale-invariant interest points [J]. International Journal of Computer Vision, 2004, 60(2) :91 - 110.
- [14] Arya S, Mount D M, Netanyahu N S, Silverman R, Wu A. An optimal algorithm for approximate nearest neighbor searching in fixed dimensions[J]. Journal of ACM, 1998, 45(6) :891 - 923.
- [15] Hartley R, Zisserman A. Multiple View Geometry in Computer Vision[M]. Canberra, Australia: Cambridge University Press, ISBN :0521623049, Jul. 2000.
- [16] Scharstein D, Szeliski R. A taxonomy and evaluation of dense twoframe stereo correspondence algorithms [J]. International Journal of Computer Vision, 2002, 47(1 - 3) :7 - 42.
- [17] Beauchemin S S, Barron J L. The computation of optical flow [J]. ACM Computing Surveys (CSUR), 1995, 27(3) :433 - 466.
- [18] Pérez P, Gangnet M, Blake A. Poisson image editing [J]. ACM Transactions on Graphics, 2003, 22(3) :313 - 318.
- [19] Szeliski R. Image Alignment and Stitching: A Tutorial [R]. Technical Report, Report No. MSR-TR-2004-92, Microsoft Research, Microsoft Corporation, One Microsoft Way, Redmond, WA, Dec. 2004.

作者简介:



刘春晓 男, 1979 年生于山东莱阳, 现为浙江大学 CAD&CG 国家重点实验室博士研究生, 主要研究领域为基于图像和视频的绘制技术、图形图像处理、模式识别与智能系统。
E-mail : liuchunxiao @cad. zju. edu. cn



彭群生 男, 1947 年生于湖南新化, 浙江大学 CAD&CG 国家重点实验室教授、博士生导师, 主要研究领域为真实感图形、虚拟现实、分子图形学和可视化技术。
E-mail : peng @cad. zju. edu. cn

杨颖振 男, 1983 年生于湖南新化, 硕士, 主要研究领域为计算机图形学和计算机视觉。

王进 男, 1971 年生于安徽萧县, 博士, 主要研究领域为计算机视觉, 基于图像的建模与绘制技术。

陈为 男, 1976 年生于湖南邵阳, 博士, 副教授, 主要研究领域为科学计算可视化和实时绘制技术。

(上接第 130 页)

- [3] ETSI. European Standard (ES) 201 873-6 V3. 1. 1 (2005-06). Methods for Testing and Specification (MTS); The Testing and Test Control Notation version 3; Part 6: TTCN-3 Control Interface (TCI). European Telecommunications Standards Institute (ETSI) [S]. Sophia-Antipolis, France, also published as ITU-T. Recommendation Z. 140, 2005.
- [4] ETSI. European Standard (ES) 201 873-5 V3. 1. 1 (2005-06). Methods for Testing and Specification (MTS); The Testing and Test Control Notation version 3; Part 5: TTCN-3 Runtime Interface (TRI). European Telecommunications Standards Institute (ETSI) [S]. Sophia-Antipolis, France, also published as ITU-T. Recommendation Z. 140, 2005.
- [5] 路晓丽. Web 应用软件的测试技术研究[D]. 西北大学, 2006.
- [6] Ina Schieferdecker, Stephan Pietsch, Theofanis Vassiliou-Gioulos. Systematic testing of internet protocols- first experiences in using TTCN-3 for SIP [A]. Proceedings of 5th Africom Conference on Communication Systems [C]. Cape Town, South Africa, May 2001.
- [7] 高翔, 蒋凡. TTCN-3 研究综述 [J]. 计算机工程与科学, 2004, 26(16) :17 - 20.
- [8] T Tworkbench, TestingTechnologies [OL]. <http://www.testingtech.de/products/ttwb/intro.php>, 2007.