

基于样本和线性结构信息的大范围图像修复算法

吴晓军^{1,2}, 李功清¹

(1. 哈尔滨工业大学深圳研究生院机电工程与自动化学院, 广东深圳 518055;

2. 深圳先进运动控制技术与现代自动化装备重点实验室, 广东深圳 518055)

摘 要: 基于纹理的图像修复算法对于修复破损区域比较大的图像效果较好, 但该算法对于含有结构信息的图像修复效果很差. 通过新的优先项的计算、平均值补偿及增加惩罚项提高传统的基于样本的图像修复算法的修复效果, 结合图像中常出现的直线和曲线结构特征, 提出了基于样本和结构信息的大范围图像修复算法. 实验表明, 该算法易于实现, 修复结果能达到令人满意的效果, 具有较高的实用价值.

关键词: 图像修复; 纹理; 样本; 结构信息

中图分类号: TP302.7

文献标识码: A

文章编号: 0372-2112 (2012) 08-7509-06

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn>

DOI: 10.3969/j.issn.0372-2112.2012.08.003

Large Scale Image Inpainting Based on Exemplar and Structure Information

WU Xiao-jun^{1,2}, LI Gong-qing¹

(1. School of Mechanical Engineering and Automation, Harbing Institute of Technology, Shenzhen Graduate School, Shenzhen, Guangdong 518055, China;

2. Shenzhen Key Lab for Advanced Motion Control and Modern Automation Equipments, Shenzhen, Guangdong 518055, China)

Abstract: Image inpainting algorithms prefer to use the texture-based method to inpaint large scale missing regions, but the result is undesirable when the image contains structural information. Through introducing new priority value, mean value complement and penalty term in the traditional exemplar based inpainting method to improve the performance of it. After combining the linear and curve structural features, we propose an exemplar and structure based inpainting algorithm for large scale missing regions in this paper. The new algorithm is easy to implement and the inpainted experimental results compared with some inpainting algorithms are plausible.

Key words: image inpainting; texture; exemplar based method; structural information

1 引言

图像修复^[1] (image inpainting) 是指利用图像中已知信息, 按照一定的规则修复未知区域, 使修复后的图像获得满意的视觉效果. 图像修复具有广阔的应用领域, 包括珍贵历史文物保护、图像中多个景物或人物的移除、通信中丢失的图像信息的修复等. 目前的图像修复算法主要有两类: 基于结构的图像修复算法和基于纹理的图像修复算法.

基于结构的图像修复方法, 主要用于对破损区域比较小的图像进行修复. 这类算法把热扩散方程原理应用

到图像修复中, 建立图像的偏微分方程, 通过解偏微分方程将图像破损区域的周边信息延伸入破损区域内部, 完成图像的修复, 比如基于 CDD (Curvature Driven Diffusion) 模型^[2]的算法和基于整体变分模型^[3] (Total Variation, TV) 的算法都属于这类算法. 如果图像的破损区域比较小, 采用这类算法可以取得好的修复效果, 然而如果图像破损区域比较大, 采用这类算法修复结果会有明显的模糊现象.

基于纹理的图像修复方法, 主要用于对破损区域比较大的图像进行修复. 这类算法主要是在图像的未损坏区域利用匹配准则寻找最相似的纹理像素块填充到图

像的破损区域完成图像修复. Criminisi 等人提出的基于样本的图像修复方法^[4,5]是这类的典型算法. 由于基于样本的图像修复算法在修复的过程中, 同时考虑到图像的纹理信息和一些简单的结构信息, 并且采用像素块为一个修复单位, 修复速度比以前有了很大提高, 是当前对破损区域比较大的图像进行修复的主流算法. Tang F 等人^[6]对 Criminisi 方法进行了改进, 提出一种依据一致性局部搜索方法 (CBLs, Coherence-Based Local Searching) 的算法来完成破损图像的修复. 微软研究院的 Sun J 等人^[7]根据基于样本的修复算法对结构信息多的图像修复效果差的缺点, 提出采用手动画出破损区域丢失的结构信息, 然后采用 BP 算法来完成图像的修复. 张岩等提出一种基于方向经验模型分解的纹理合成的图像修复算法^[13], 该方法对于结构较强的图像会造成修复失败. Wen P. Z. 等提出一种基于径向基函数 (Radial basis function, RBF) 的图像算法, 利用破损区域的边缘像素构造 RBF 隐式曲面, 破损区域的像素由隐式曲面插值获得^[12], 该方法修复的大范围破损区域修复较模糊. Wu J. Y 等人^[8]根据 Criminisi 的思想提出一种按照垂直于等照度线方向进行图像修复的算法. 这类算法, 由于同时考虑了图像的纹理信息和一些简单的结构信息, 对于破损区域较大的图像修复速度快且有良好的修复效果, 是当前研究的重点方向.

目前对于破损区域比较大的区域修复算法, 以基于样本的修复算法为主. 然而, 这种算法对于结构信息丰富的图像修复效果差. 本文结合图像的纹理和结构特征, 提出了一种新的算法. 根据图像中纹理和结构信息不同, 采用不同的修复策略: 对于纹理信息丰富而结构信息较少的图像采用改进的基于样本的修复算法, 而对于同时含有丰富的纹理和结构特征明显的图像, 采用结构优先的原则. 针对图像中常出现的直线和曲线结构特征, 提出了基于直线特征的修复算法和基于曲线特征的修复算法, 图 1 为是本文算法的流程图.

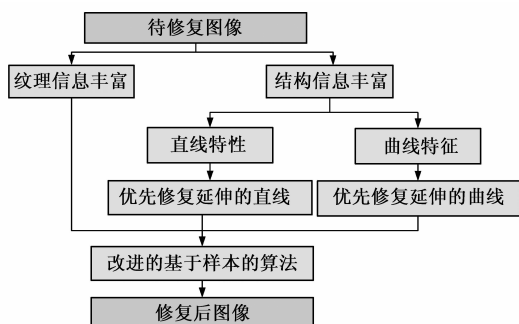


图1 本文的算法流程图

2 Criminisi 算法

Criminisi 修复算法是 2003 年提出的基于样本的图

像修复方法^[4], 主要用于破损区域大的图像修复. 该算法考虑了图像的形态学结构因素, 既能有效的保持对纹理信息的敏感性, 又能保持图像中一些简单的结构信息, 已经成为了当前的研究热点. Criminisi 算法有三个主要步骤:

(1) 找出优先项最高的待修复像素块

Criminisi 认为, 图像的修复顺序由优先项决定. 优先项含有两个因素: 置信项 $C(p)$ 和数据项 $D(p)$. 置信项表示待修复像素块中含有的已知像素的比例, 数据项表示处于断裂边缘的像素点可以得到优先修复. Criminisi 规定: 如果图像的像素处于已知区域时 $C(p)$ 为 1, 处于待修复区域时 $C(p)$ 为 0.

设 Ω 为待修复区域, Φ 为已知区域, $\partial\Omega$ 为待修复区域的边界线, p 为 $\partial\Omega$ 上的一个像素点, ψ_p 为以 p 为中心的待修复像素块

优先项的定义为:

$$P(p) = C(p) * D(p) \quad (1)$$

式中, $C(p) = \frac{\sum_{q \in \psi_p \cap (\Omega - \Omega)} C(q)}{|\psi_p|}$, $D(p) = \frac{|\nabla I_p^\perp \cdot n_p|}{\alpha}$. ∇I_p^\perp 表示 p 点的等照度线的方向和强度, n_p 是 p 点的单位法线方向向量, α 为标准化系数.

计算出以边缘上每个像素点为中心的待修复像素块的优先项, 找出优先项最大的待修复像素块.

(2) 在图像的已知区域寻找最佳匹配像素块并把最佳匹配像素块对应位置的像素值填充到待修复像素块的对应位置.

假设 ψ_p 是优先项最高的待修复像素块, 利用 Euclidean 距离函数作为匹配准则, 计算出最佳匹配像素块.

$$\psi_q = \arg \min d(\psi_p, \psi_q), \psi_q \in \Phi \quad (2)$$

式中, ψ_q 是已知区域中的任一样本块, 它的所有像素点都位于已知区域内.

(3) 更新刚填充的像素点的置信项

在块 ψ_p 被新的像素值填充后, 新填充的像素点由待修复区域变为已知区域, 需要对其置信项进行更新, 以保证没修复过的像素点能得到优先修复.

$$C(p) = C(\hat{p}), \forall p \in \psi_p \cap \Omega \quad (3)$$

通过不断重复上面的三个步骤, 迭代修复, 即可完成整幅图像的修复.

3 基于样本和结构的图像修复算法

根据图像中纹理和结构信息不同, 本文算法分为三部分: 改进的基于样本的修复算法, 基于直线特征和曲线特征的修复算法.

3.1 改进的基于样本的图像修复算法

3.1.1 Criminisi 算法分析

Criminisi 算法对破损区域比较大的区域具有好的

修复效果.然而,经过大量的实验后却发现,随着图像中待修复区域的不断增大,修复结果中出现了线性结构的“断层”现象,而且在修复区域内有时会出现大量的“垃圾物”(over-shoot artifact).

Criminisi 算法之所以存在上述不足,主要有以下原因:

(1)边界像素优先项的计算采用了置信项与数据项的乘积.这样,如果数据项为零,即使置信项很高由于优先项为零也不能得到优先修复.由于高纹理区域数据项不为零,这样就造成了高纹理区域的修复先于低纹理区域,出现高纹理区域的修复过度扩展.

(2)寻找最佳匹配像素块时,算法采用的是一种全局搜索方法.如果图像含有噪声,常常会出现错误的匹配,由于没有考虑填充误差,随着修复过程的进行,会造成修复误差的不断累积,使修复结果中出现大量的“垃圾物”.

(3)图像中有明显的结构特征时,由于严格的按照像素块的优先项进行修复,容易造成结构特征的断裂,在修复结果中出现“断层”现象.

(4)算法没有考虑到同一个像素块多次重复使用的问题,会使修复的图片看起来有人为改动的痕迹.

3.1.2 基于样本的改进修复算法

针对上述 Criminisi 算法的不足,本文提出了一种改进的基于样本的图像修复算法.

(1)优先项的计算

本算法提出了一种新的优先项的计算方法:

$$P(p) = \alpha \cdot C(p) + \beta \cdot D(p) \quad (4)$$

其中: $\alpha + \beta = 1$. 当 $D(p) = 0$ & $C(p) > 0.8$ 时, $\alpha = 1, \beta = 0$; 当 $D(p) \neq 0$ & $C(p) \neq 0$ 时, $\alpha = 0.382, \beta = 0.618$; 当 $D(p) = 0$ & $C(p) < 0$ 时, $\alpha = 0, \beta = 0$. 这样能保证当数据项为零时,只要置信项足够高,也可以得到优先修复;当数据项为零并且置信项低时,使优先项 $P(p)$ 为零,表示这个像素块后修复;当数据项和置信项都不为零时,采用了黄金分割点,使数据项占主导因素,即采用结构优先的修复方法,符合视觉心理学原理.采用这样的优先项计算方法,即可以有效的解决 Criminisi 算法低纹理区域修复滞后的问题也可以解决修复顺序完全按照线性结构的方向进行问题,有利于“断层”的消除.

(2)误差的减小

由于 Criminisi 算法搜寻到最佳匹配像素块后,把最佳匹配块对应位置的像素值直接填充到待修复块的相应位置,会造成填充误差.随着修复过程的进行容易造成误差的大量累积.针对这一问题,本算法提出了平均值补偿的方法.

$$A_v = \frac{\sum d(\psi_p, \psi_p)}{|\psi_p|}, p \in (\psi_p \cap \Phi) \quad (5)$$

式中, ψ_p 块是待修复像素块, ψ_p 块是最佳匹配像素块.

通过计算待修复像素块与最佳匹配像素块之间已知像素值之间的差的平均值并用于填充对应位置像素值,起到补偿作用,减少直接填充的误差.可以减少直接填充的误差,避免随着修复过程的进行误差会严重累积产生大量“垃圾物”的现象.

(3)增加惩罚项

为了避免同一个像素块在修复过程中被多次使用,造成修复后的图像看起来有人为修复的痕迹,算法增加代价函数即惩罚项^[9].

设 $dup(q)$ 表示像素 q 的使用次数,初始值为 0,使用 1 次增加 1.

$$w_{dup}(q) = \frac{\sum dup(i)}{|\psi_q|}, q \in \psi_q \quad (6)$$

表示最佳匹配像素块中像素使用次数的平均值.

代价函数(惩罚项)为:

$$m = \log(w_{dup}(q) + 1) \quad (7)$$

在计算最佳匹配像素块时,采用新的匹配准则:

$$M(p, q) = \psi_q = \arg \min d(\psi_p, \psi_q) + \log(w_{dup}(q) + 1), q \in \Phi \quad (8)$$

式中,前一项表示像素块直接的距离即距离项,后一项表示代价函数即惩罚项.

采用新的优先项计算方法,增加平均值补偿和惩罚项,可以在很大程度上解决同一个像素块重复使用造成图像看起来有人为修复痕迹的问题.重复执行第 2 节中的 Criminisi 算法的三个步骤,即可完成纹理信息丰富的破损图像的修复.

3.2 基于直线特征的图像修复算法

如果图像中含有明显的直线特征,采用基于样本的修复算法,修复结果中会出现直线结构的断裂情况,严重影响修复效果.针对这一缺点,对于含有明显直线的破损图像,提出基于直线特征的修复算法.先利用 Hough 变换检测出图像中的直线特征,然后修复破损区域内位于直线上的像素点,剩余部分采用改进的基于样本的修复算法.

检测图像中的直线有很多方法, Hough 变换^[10]是经常使用的方法.通过参量空间中的一条曲线或者一个曲面是由测量空间的一个点转变形成的,如果具有很多特征相同的参变量,那么这些点经过变换后会在参量空间中相交,通过计算过交点的数量来完成特征直线的检测. Hough 变换对于含有噪声的图像中直线检测具有很好的效果,所以本文选择 Hough 变换来检测图像中的直线.

利用 Hough 变换检测出图像中的直线后,首先,利用式(4)计算出直线与待修复区域边缘相交处所有像

素点的优先项,找出优先项最大的像素块作为待修复像素块.然后,利用式(8)对即在图像已知区域又在 Canny 边缘检测检测出的边缘上的符合条件的像素块进行计算,找出最佳匹配像素块,利用最佳匹配像素块中的像素值填充对应位置的待修复像素块中的未知像素点.最后,对新填充的像素点进行置信项的更新.

重复上面的步骤就可以完成破损区域内直线部分的修复,剩余部分利用改进的基于样本的图像修复算法修复,这样就可以得到完全修复后的图像.

3.3 基于曲线特征的图像修复算法

如果图像中含有明显的曲线特征,采用基于曲线特征的图像修复算法.首先用图像分割算法对图像进行分割找出主要的曲线特征,然后根据一定的规则,利用最小二乘法拟合出曲线,优先修复曲线结构部分,最后利用改进的基于样本的修复算法完成剩余部分的修复.

图像分割的目的是把整幅图像按照不同的要求分割成不同的区域,分割形成的区域满足:同一个区域内的像素点在纹理、灰度等方面有很高的相似度;不同区域之间应该具有很大的差异性;分割后的图像应该具有明显的分割边界.对分割后的图像进行 Canny 边缘检测即可找出图像中明显的曲线特征.本文采用 K-means 分割算法^[11],由用户根据图像选择分割的区域数,便于把主要的曲线特征延伸入待修复区域.

在检测出分割后的图像边缘后,找出位于待修复区域两侧且像素值相近的边缘上的像素点,利用最小二乘法拟合出二次曲线.这样就可以把曲线特征延伸入待修复区域内.

利用式(4)计算出曲线与目标区域边缘相交处所有像素点的优先项,找出优先项最大的像素块作为待修复像素块.然后,利用式(8)对即在图像已知区域又在 Canny 边缘检测检测出的边缘上的符合条件的像素块进行计算,找出值最小的像素块作为最佳匹配像素块,利用最佳匹配像素块中的像素值填充对应位置的待修复像素块中的未知像素点.最后,对新填充的像素点进行置信项的更新.

重复上面的步骤就可以完成破损区域内曲线部分的修复,剩余部分利用改进的基于样本的图像修复算法修复,这样就可以得到完全修复后的图像.

4 实验结果

本算法是在 VC6.0 开发环境下,使用 C++ 语言,利用 OpenCV 开源计算机视觉库,在配置为 Intel(R) Pentium(R) 4 CPU 2.6GHz, 512M 内存的计算机上实现.本文给出了一些有代表性的图像修复结果,并把实验结果与 RBF 算法^[12]和 Criminisi 算法^[4]的结果进行了比较.

图2本文中改进的基于样本的图像算法算法的实验结果与基于 RBF 的图像修复算法以及 Criminisi 算法的结果进行的比较.通过图2可以看出,由于采用了新的优先项计算方法,填充过程中采取了平均值补偿的方法减小误差和增加惩罚项来减少同一个像素块重复使用,本文提出的改进的基于样本的图像修复算法获得了比基于 RBF 的图像修复算法和 Criminisi 算法更好的结果.

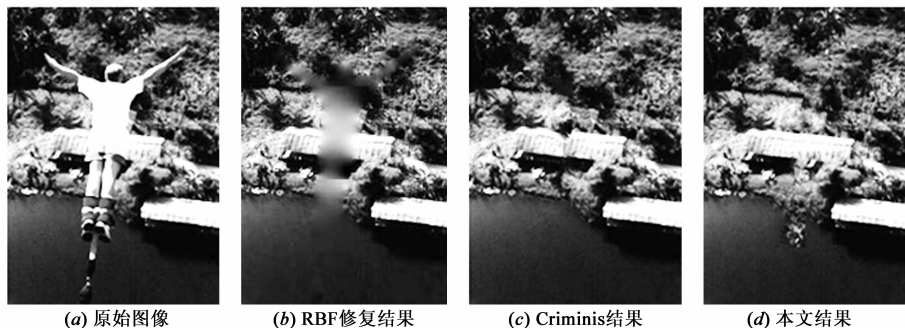


图2 人物的移除

图3基于直线特征的图像修复算法的实验结果和 Criminisi 算法的结果进行的比较.通过图3可以看出,对于含有直线结构特征的图像, Criminisi 算法只是靠待修复区域边缘上像素点的优先项的高低进行修复,没有优先考虑到图像中的直线结构特征,修复效果不能令人满意.而本文提出的基于直线特征的图像修复算法,首先利用 Hough 变换检测出图像中明显的直线特征,然后按照直线结构优先的修复算法,对于含有直线

结构特征的图像修复效果很好.

图4和图5是本文中基于曲线特征的图像修复算法的实验结果和 Criminisi 算法的结果进行的比较.通过图4和图5可以看出,对于含有曲线结构特征的图像, Criminisi 算法由于没有考虑到图像中的曲线结构特征,只是靠优先项的高低进行修复,修复效果并不能达到人们预想的效果.而本文提出的基于曲线特征的图像修复算法,按照曲线结构优先的修复算法,对于含有曲

线结构特征的图像修复效果很好.算法的计算效率方面对于分辨率为 280x170 的图像平均修复时间约为

240s.



(a) 原始图像



(b) RBF修复结果



(c) Criminis结果

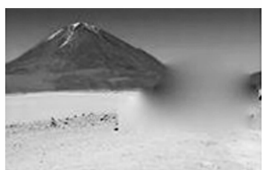


(d) 本文结果

图3 人马的移除



(a) 原始图像



(b) RBF修复结果

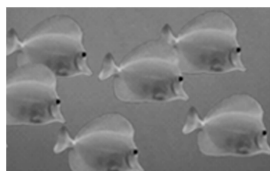


(c) Criminis结果

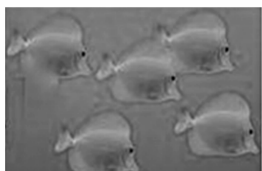


(d) 本文结果

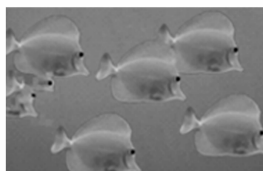
图4 车的移除



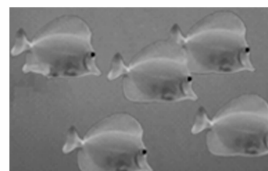
(a) 原始图像



(b) RBF修复结果



(c) Criminis结果



(d) 本文结果

图5 鱼的移除

5 结论

现有的图像修复算法,要么偏重纹理信息的修复,要么偏重结构信息的修复,没有把纹理和结构信息有效的统一起来.针对这种情况,本文根据图像中纹理和结构信息不同,提出基于样本和结构信息的大范围图像修复算法.实验结果显示,本文提出的算法,适用范围广泛,对图像中含有强的线性和曲线特征能获得令人满意的修复效果,具有很高的实用价值.下一步的工作是找出更快捷准确的方法检测出图像中的结构信息并延伸入待修复区域.然而对于受损区域的边界呈非线性变化时推测出边界的变化将是非常困难的,这本身是一个病态的问题,这也是大范围受损的图像修复的难点所在.因此对于复杂边界的问题,可以采用学习或全局优化的办法来解决.

参考文献

- [1] Bertalmio M, Sapiro G, et al. Image inpainting[A]. Proceedings of the 27th Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques [C]. New Orleans, LA, USA: Addison-Wesley Publishing, 2000. 417 – 424.
- [2] Chan T, Shen J. Nontexture inpainting by curvature-driven diffusions[J]. Journal of Visual Communication and Image Repre-

sentation, 2001, 12(4): 436 – 449.

- [3] Tai X, Borok S, et al. Image denoising using TV-stokes equation with an orientation-matching minimization[A]. International Conference on Scale Space and Variational Methods in Computer Vision [C]. Voss, Norway, 2009. 490 – 501.
- [4] Criminisi A, Pérez P, et al. Object removal by exemplar-based inpainting[A]. CVPR[C]. Madison, WI, USA: IEEE Computer Society, 2003. 2: 721 – 728.
- [5] Criminisi A, Pérez P, et al. Region filling and object removal by exemplar-based image inpainting[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2004, 13(9): 1200 – 1212.
- [6] Tang F, Ying Y, et al. A novel texture synthesis based algorithm for object removal in photographs[J]. Advances in Computer Science-ASIAN 2004, 2005: 3299 – 3300.
- [7] Sun J, Yuan L, et al. Image completion with structure propagation[A]. SIGGRAPH 2005[C]. Los Angeles, CA, USA: ACM, 2005. 24: 861 – 868.
- [8] Wu J, Ruan Q. Object removal by cross isophotes exemplar-based inpainting[J]. Pattern Recognition, 2006, 3: 810 – 813.
- [9] Nie D, Ma L, Xiao S. Similarity based image inpainting method [A]. 2006 12th International Multi-Media Modelling Conference Proceedings [C]. Beijing, China: Springer, 2006. 344 – 347.
- [10] Akhtar M, Atiquzzaman M. Determination of line length using

- ough transform[J]. Electronics Letters, 2008, 28(1): 94 – 96.
- [11] Ray S, Turi R. Determination of number of clusters in K-means clustering and application in colour image segmentation [A]. Proceedings of the 4th International Conference on Advances in Pattern Recognition and Digital Techniques [C]. Calcutta, India: Narosa Publishing House, New Delhi, India, 1999. 137 – 143.
- [12] Wen PZ, Wu XJ, et al. An interactive image inpainting method based on RBF networks [A]. Third International Symposium on Neural Networks, LNCS Part II [C]. Chengdu: Springer, 2006. 3972: 629 – 637.
- [13] 张岩, 孙正兴, 姚伟. 基于方向经验模型分解的图像修复方法[J]. 电子学报, 2010, 38(2): 257 – 262.

Zhang Yan, Sun Zhengxing, et al. Image completion based on direction empirical mode decomposition [J]. Acta Electronica Sinica, 2010, 38(2): 257 – 262. (in Chinese)

作者简介



吴晓军 男, 1975 年生于甘肃张掖. 哈尔滨工业大学深圳研究生院副教授. 研究方向为基于图像的三维建模、三维重建、机器视觉、CAD 技术等.

E-mail: wuxj@hitsz.edu.cn

李功清 男, 1981 年生. 硕士研究生, 研究计算机视觉, 图像处理.