

基于矩阵相似度的最佳样本块匹配算法及其在图像修复中的应用

翟东海^{1,2} 李同亮¹ 段维夏¹ 鱼江¹ 肖杰¹

(西南交通大学信息科学与技术学院 成都 610031)¹ (西藏大学工学院 拉萨 850000)²

摘要 在基于纹理合成的图像修复算法中,最佳样本块匹配算法存在匹配精度不高和时间复杂度高等问题。针对上述问题,首先构造了块匹配算法,采用矩阵相似度来计算模板块与样本块之间的匹配度,以相对较粗的粒度初步选出最佳样本块的候选集。然后,又构造了像素点匹配算法,采用模板块与候选最佳样本块之间的误差矩阵的内积来计算对应像素点之间的匹配度,以更细的粒度来确定最终的最佳样本块。块匹配算法降低了时间复杂度,像素点匹配算法提高了匹配精度,因此,在此基础上构造的基于相似矩阵的最佳样本块匹配算法能够在不增加时间复杂度的情况下提高算法的匹配精度。实例验证结果表明,与当前基于纹理的图像修复算法相比,该算法的匹配精度提高,时间复杂度降低。

关键词 图像修复,块匹配,矩阵相似度,像素点匹配

中图分类号 TP301.6 **文献标识码** A

Optimal Exemplar Matching Algorithm Based on Matrix Similarity and its Application in Image Inpainting

ZHAI Dong-hai^{1,2} LI Tong-liang¹ DUAN Wei-xia¹ YU Jiang¹ XIAO Jie¹

(School of Information Science and Technology, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)¹

(Engineering School, Tibet University, Lhasa 850000, China)²

Abstract In the image inpainting algorithm based on texture synthesis, the matching accuracy of optimal exemplar matching is not high but its time complexity is too high, which eventually leads to errors in image inpainting. Focusing on these two issues, firstly, the block matching algorithm was constructed and the matching degree between template and exemplars was measured by using matrix similarity, so, the candidate set of optimal exemplar was preliminarily determined in relatively coarse granularity. Secondly, the pixel matching algorithm was constructed and the matching degree between corresponding pixels was measured by inner product of error matrix between template and candidate exemplar, so, the final optimal exemplar was determined in fine granularity. The block matching algorithm can reduce the time complexity while the pixel matching algorithm can improve matching accuracy, therefore, the optimal exemplar matching algorithm based on matrix similarity can improve matching accuracy without raising time complexity. The experimental results demonstrate that, compared with current texture-based inpainting algorithm, the proposed algorithm can improve matching accuracy and reduce time complexity.

Keywords Image inpainting, Block matching, Matrix similarity, Pixel matching

1 引言

基于纹理合成^[1-5]的图像修复算法是数字图像处理技术的一个重要分支,它考虑了图像的形态学结构因素,既能有效地保持对纹理信息的敏感度,也能保持一些简单的结构信息。在修复破损区域较大的图像时,该算法明显优于基于结构^[6-9]的图像修复算法,因而已成了当前的研究热点。

但是,基于纹理合成的图像修复算法由于在寻找最佳样本块时常常采用了 SSD 准则(sum of squared differences)函

数,这将导致如下两种结果^[5,10-12]: 1) 算法的修复精度不高; 2) 算法的时间复杂度高。对此,文献[5]提出一种基于图像纹理分布分析的快速图像修复算法,该算法是根据局部纹理变化动态确定样本集大小,解决样本集过大时引起的计算时间浪费以及样本集过小时样本多样性不足的问题,但是该算法在待修复区域周围像素变化较剧烈和复杂时,其大部分时间使用大的样本集选择最佳匹配块来满足样本多样性要求,使得算法精度的提高不太明显。文献[10]对纹理合成算法的样本匹配技术进行改进,提出了一种基于图像平均灰度值的快

到稿日期:2013-03-12 返修日期:2013-06-15 本文受国家自然科学基金项目(12EF119),国家级大学生创新创业训练计划项目(201210694019)资助。

翟东海(1974—),男,博士,副教授,主要研究方向为数字图像处理、海量数据挖掘, E-mail: dhzhai@swjtu.edu.cn; 李同亮(1986—),男,硕士生,主要研究方向为数字图像处理; 段维夏(1990—),女,硕士生,主要研究方向为数字图像处理; 鱼江(1990—),男,主要研究方向为数字图像处理; 肖杰(1989—),女,硕士生,主要研究方向为数字图像处理。

速图像修复算法,这种算法很大程度上减少了不必要的 SSD 的匹配计算,从而改善了纹理算法的执行效率,但是不能很好地自适应地确定算法中所涉及的阈值来同时保证修复质量和效率。文献[11]提出了一种基于样本块的快速图像修复算法,该算法引入新的度量函数更新置信度,使优先级的计算更加准确,同时,待匹配块的再筛选策略降低了选择最佳匹配块的随机性,已修复样本块邻域检测避免了全局范围内寻找破损边缘,但其仍然对初始边界很敏感,边界的微小变化可导致合成结果的很大差异,需要用户多次修复参数,积累经验,从而其算法修复效果的总体评价仍然不理想。文献[12]提出非均匀纹理图像大区域修复算法,该算法在传统图像修复算法优先权系数的基础上,增加了方向性优先权系数,并针对非均匀纹理图像渐近变化的特点,将以待修复块为中心的扇形区域作为最优匹配块的搜索区域,以减少误匹配,该方法能够有效克服传统纹理合成方法没有考虑方向性的缺点,但是它对于图像结构修复效果改善不明显,对于结构信息显著的表现更为突出。

针对基于纹理合成的图像修复算法修复精度不高和算法的时间复杂度高的问题,本文首先构造了块匹配算法,采用矩阵相似度来计算模板块与样本块之间的匹配度,以相对较粗的粒度初步选出最佳样本块的候选集。然后又构造了像素点匹配算法,采用模板块与候选最佳样本块之间的误差矩阵的内积来计算对应像素点之间的匹配度,以更细的粒度来确定最终的最佳样本块。块匹配算法降低了算法的时间复杂度,像素点匹配算法提高了算法的匹配精度。最后将所提算法对破损图像的修复效果与 Criminisi 算法、文献[5]算法、文献[10]算法、文献[11]算法以及文献[12]算法进行了比较,实例验证结果表明,所提出的算法的修复精度提高,时间复杂度降低。

2 最佳样本块匹配算法

2.1 算法概述

为了有效改善模板块与样本块之间的匹配精度并降低匹配运算的时间消耗,本文提出了基于矩阵相似度的最佳样本块匹配算法。该算法包括两个步骤(见图 1):第一步,将模板块和样本块分别转化成对应的模板矩阵和样本矩阵,并计算这两个矩阵的相似度,当相似度超过阈值 ϵ 时就将该样本块放入最佳样本块候选集。这一步骤由于是在块的层次进行最佳样本块的初选,因此也叫做块匹配阶段。第二步,从像素点的角度计算模板块与候选最佳样本块的匹配度,并将相似度最大的样本块作为最终的最佳样本块,这一步骤叫做像素点匹配阶段。由于本文提出的算法以块、像素点两种不同的粒度来计算模板块和样本块之间的匹配程度,使得匹配的精度可以得到明显的改善;同时,由于最佳样本块候选集的初选作用,使得更细粒度的像素点匹配阶段的运算量大幅降低,从而使算法的总耗时明显降低。

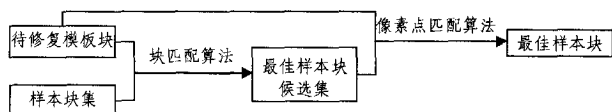


图 1 最佳样本块匹配算法流程

2.2 块匹配算法

在块匹配算法中,本文提出的算法从整体角度来考虑模板块和样本块的相似度,首先将模板块和样本块转化为相应的模板矩阵和样本矩阵,然后再利用矩阵相似度来衡量它们之间的匹配程度(见图 2)。下面引进矩阵相似度^[13]的概念,设 $C^{m \times n}$ 表示 $m \times n$ 矩阵全体,若 $A, B \in C^{m \times n}$, 则矩阵内积 $\langle \cdot, \cdot \rangle$ 定义为:

$$\langle A, B \rangle = \text{tr}(B^T A) \quad (1)$$

式中, $\text{tr}(\cdot)$ 表示矩阵主对角线元素之和。类似于向量的内积,矩阵内积表示两个矩阵对应位置元素的乘积的累加和。由矩阵内积可导出其范数 $\|\cdot\|$ 为:

$$\|A\| = \sqrt{\langle A, A \rangle} \quad (2)$$

这样,矩阵相似度 r 定义为:

$$r = \cos\theta = \frac{\langle A, B \rangle}{\|A\| \cdot \|B\|} \quad (3)$$

式中, θ 为两个矩阵之间的夹角, r 的值域为 $[-1, 1]$ 。则当 $\theta = 90^\circ$ 时, $r = 0$, 表示两个矩阵不相似;当 $\theta = 0^\circ$ 时, $r = 1$, 此时两个矩阵相似性最好。

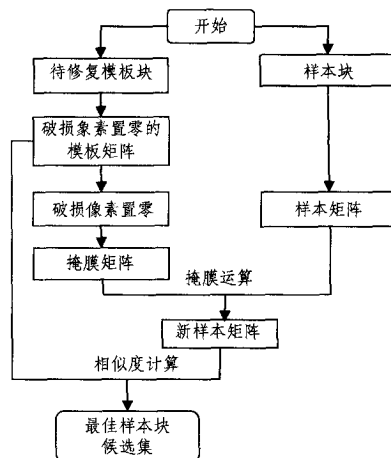


图 2 块匹配算法流程

图像的每个 $n \times n$ 的像素块均可转化成一个 n 阶方阵,因此,在块匹配算法中(见图 2),先将以待修复点 p 为中心的模板块转成模板矩阵 Ψ_p ,并将各破损像素点所对应位置的矩阵元素取值为 0,其它像素点所对应位置的矩阵元素取值为该像素点的灰度值。同理,将以完好区域像素点 q 为中心的样本块转成样本矩阵 Ψ_q ,各矩阵元素的取值为对应位置像素点的灰度值。由模板矩阵 Ψ_p 求得其掩膜矩阵^[14] Ψ_m ,根据掩膜矩阵 Ψ_m 的矩阵元素的取值为 1 或 0 将样本矩阵 Ψ_q 对应位置上的矩阵元素的值保留或者置 0 得到新样本矩阵 Ψ_q' 。为了求得模板块与样本块之间的匹配度,需要将式(3)改造为计算模板矩阵 Ψ_p 与新样本矩阵 Ψ_q' 之间的相似度(见式(4)):

$$\text{Match_block}(\Psi_p, \Psi_q) = \frac{\langle \Psi_p, \Psi_q' \rangle}{\|\Psi_p\| \cdot \|\Psi_q'\|} \quad (4)$$

当模板块与样本块之间的匹配度 $\text{Match_block}(\Psi_p, \Psi_q')$ 大于预先设定的阈值 ϵ 时,就将该样本块标记为候选最佳样本块并放入最佳样本块候选集。

块匹配算法从一个宏观和整体的角度来寻找模板块的候选最佳样本块,由于其属于粗粒度匹配,能够快速地从大量样本块中找到匹配度最高的几个候选最佳样本块,使得后续的匹配运算范围大为缩小。

2.3 像素点匹配算法

在经过块匹配算法初选得到很少的几个候选最佳样本块后,为了进一步提高匹配精度,还需要利用像素点匹配算法以更细的粒度来进行匹配运算(见图3),选出最终的最佳样本块。首先,从最佳样本块候选集中选出一个候选样本块并求得其对应的样本矩阵 Ψ_q ,将样本矩阵 Ψ_q 与模板矩阵 Ψ_p 对应位置的矩阵元素相减得到误差矩阵 $\Delta\Psi$,即 $\Delta\Psi = \Psi_q - \Psi_p$ 。通过对 $\Delta\Psi$ 求内积(见式(1)),可以获得样本块与模板块之间的误差平方和,误差平方和越小表明二者的匹配程度越高,反之,误差平方和越大表明二者的匹配程度越低。可见,匹配度与误差平方和成反比例关系,即匹配度可以用误差平方和的倒数来刻画(见式(5))。由于误差平方和处于式(5)的分母位置,为了避免当误差平方和等于0时式(5)失去意义,需要在式(5)的分母中引入一个非常小的正数 α 。按照式(5)对最佳样本块候选集中的每一个样本块求出其与模板块的匹配度,并按照匹配度的大小按降序进行排序,选出匹配度最高的样本块作为最终的最佳样本块。

$$Match_pixel(\Psi_p, \Psi_q) = \frac{1}{\|\Delta\Psi\| + \alpha} = \frac{1}{\|\Psi_q - \Psi_p\| + \alpha} \quad (5)$$

其中, $Match_pixel(\Psi_p, \Psi_q)$ 为样本块与模板块之间对应像素点的匹配度。

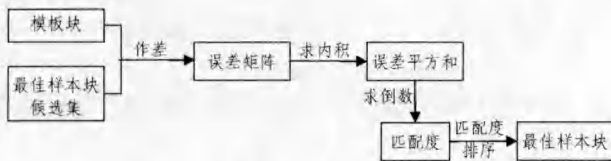


图3 像素点匹配算法流程

3 改进后的图像修复算法

本文提出的最佳样本块匹配算法,先利用矩阵相似度初步计算模板块和样本块整体的相似度,再利用误差矩阵的内积进一步精确地计算模板块和样本块对应像素点间的相似度,从而最终确定最佳样本块,这样就大大提高了模板块和最佳样本块之间的匹配程度。在此基础上,对 Criminisi 算法加以改进并用于图像修复,具体流程如下(见图4):

1)对破损图像进行预处理,确定待修复区域的边界。

2)利用 Criminisi 算法计算破损区域中待修复点的优先级,并确定最先修复的像素点 p 。

3)对以待修复像素点 p 为中心的模板块,先采用本文提出的块匹配算法得到其最佳样本块候选集,再利用像素点匹配算法来确定其最终的最佳样本块。

4)将最佳样本块复制到以修复点 p 为中心的模板块所在的位置。

5)填充新的像素后,更新各点的置信度,并重新计算待修复点周围像素点的优先级(其余边缘点保持不变)。重复步骤2)~5),直到破损区域中的像素都被修复完。



图4 改进后的图像修复算法

4 实例验证

为了验证本文提出的基于矩阵相似度的最佳样本块匹配算法的有效性,我们做了以下实验:1)将本文算法和 Criminisi 算法的修复效果进行对比;2)将本文算法和文献[5]算法的修复效果进行对比;3)将本文算法和文献[10]算法的修复效果进行对比;4)将本文算法和文献[11]算法的修复效果进行对比;5)将本文算法和文献[12]算法的修复效果进行对比。图5~图8是本文对壁画/唐卡图像进行修复所得的2组代表性实验结果,图5、图7是修复的原图,图6、图8是对图5、图7修复结果的放大效果,在各图中:(a)为原始图像;(b)为破损图像;(c)为采用 Criminisi 算法的修复效果;(d)为采用文献[5]算法的修复效果;(e)为采用文献[10]算法的修复效果;(f)为采用文献[11]算法的修复效果;(g)为采用文献[12]算法的修复效果;(h)为采用本文算法的修复效果。根据经验,本文算法的参数阈值 ϵ 取 0.35,采用6种算法进行图像修复所得 PSNR 值和总耗时比较结果如表1~表4所列。



图5 修复效果比较

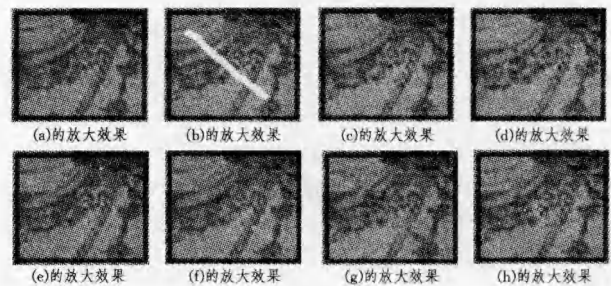


图6 修复效果放大对比

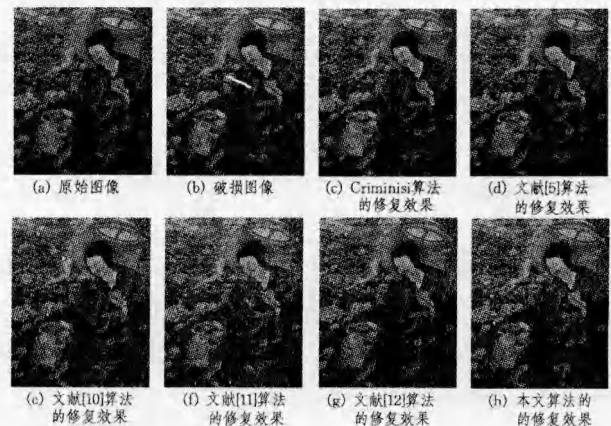


图7 修复效果比较

从表1—表4可以看出,和 Criminisi 算法、文献[5,10-12]算法相比,本文提出的算法不仅在图像修复结果中的精度有所改善,而且算法的效率也有所提高。这是因为本文提出的最佳样本块匹配算法首先利用矩阵相似度初步计算模板块和样本块整体的相似度,得出一个最佳样本块候选集;然后利用误差矩阵的内积来精确地计算模板块和样本块对应像素点之间的相似度。第一步在不影响算法精度的同时,提高了算法的效率,而第二步提高了算法的图像修复精度。所以本文提出的算法在进行图像修复的过程中,不仅提高了图像的修复精度,而且提高了算法的效率,这一理论分析与实验结果相吻合。

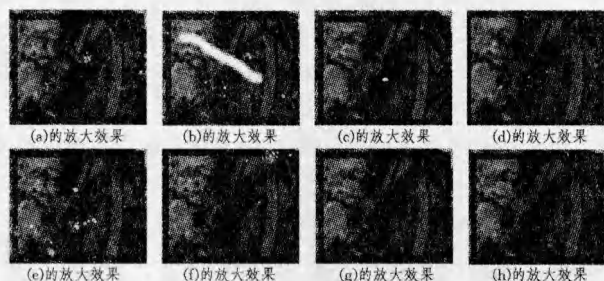


图8 修复效果放大对比

表1 图像修复的 PSNR 值比较

实验	其它算法 PSNR	本文算法 PSNR	精度提高/%
Criminisi 算法(图 5/6(c))	22.10	27.32	23.62
文献[5]算法(图 5/6(d))	25.84	27.32	5.73
文献[10]算法(图 5/6(e))	25.31	27.32	7.94
文献[11]算法(图 5/6(f))	24.12	27.32	13.26
文献[12]算法(图 5/6(g))	26.01	27.32	5.03

表2 运行时间比较

实验	其它算法(s)	本文算法(s)	效率提高/%
Criminisi 算法(图 5/6(c))	692.15	357.32	48.38
文献[5]算法(图 5/6(d))	421.39	357.32	15.20
文献[10]算法(图 5/6(e))	387.56	357.32	7.80
文献[11]算法(图 5/6(f))	401.40	357.32	10.98
文献[12]算法(图 5/6(g))	702.41	357.32	49.13

表3 图像修复的 PSNR 值比较

实验	其它算法 PSNR	本文算法 PSNR	精度提高/%
Criminisi 算法(图 7/8(c))	21.10	27.10	28.44
文献[5]算法(图 7/8(d))	24.62	27.10	10.07
文献[10]算法(图 7/8(e))	24.28	27.10	11.61
文献[11]算法(图 7/8(f))	23.03	27.10	17.67
文献[12]算法(图 7/8(g))	25.12	27.10	7.88

表4 运行时间比较

实验	其它算法(s)	本文算法(s)	效率提高/%
Criminisi 算法(图 7/8(c))	701.12	381.05	45.65
文献[5]算法(图 7/8(d))	435.29	381.05	12.46
文献[10]算法(图 7/8(e))	397.48	381.05	4.13
文献[11]算法(图 7/8(f))	399.45	381.05	4.61
文献[12]算法(图 7/8(g))	690.33	381.05	44.80

结束语 本文提出了基于矩阵相似度的最佳样本块匹配算法。该算法首先采用矩阵相似度来计算模板块与样本块之

间的匹配度,以相对较粗的粒度初步选出最佳样本块的候选集。然后又构造了像素点匹配算法,采用模板块与候选最佳样本块之间的误差矩阵的内积来计算对应像素点之间的匹配度,以更细的粒度来确定最终的最佳样本块。块匹配算法降低了算法的时间复杂度,像素点匹配算法提高了算法的匹配精度。实例验证结果表明,与当前基于纹理的图像修复算法相比,本文提出的算法在没有增加算法的时间复杂度的同时,提高了图像修复的精度。

参考文献

- [1] Criminisi A, Perez P, Toyama K. Region filling and Object removal by exemplar-based image inpainting [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2004, 13(9): 1200-1212
- [2] Efros A, Freeman A. Image quilting for texture synthesis and transfer [C] // Proceedings of SIGGRAPH. New York, NY, USA: ACM Press, 2001: 341
- [3] Efros A, Leung T. Texture synthesis by non-parametric sampling [C] // Proceedings of the International Conference on Computer Vision. Kerkyra, Greece: IEEE Press, 1999: 1033-1038
- [4] Wei L, Levoy M. Fast texture synthesis using tree-structured vector quantization [C] // Proceedings of Siggraph. New York, NY, USA: ACM Press, 2000: 479-488
- [5] 张晴,林家骏. 纹理分布分析的快速图像修复算法[J]. 中国图象图形学报, 2012, 17(1): 0123-0129
- [6] Bertalmio M, Sapiro G. Image inpainting [C] // Proceedings of SIGGRAPH. New York, NY, USA: ACM Press, 2000: 417-424
- [7] 李民,程建,李小文,等. 非局部学习字典的图像修复[J]. 电子与信息学报, 2011, 33(11): 2672-2678
- [8] Bertalmio M, Vese L, Sapiro G, et al. Simultaneous structure and texture image inpainting [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2003, 12(8): 882-889
- [9] Elad M, Starck J-L, Querre P, et al. Simultaneous cartoon and texture image inpainting using morphological component analysis (MCA) [J]. Applied and Computational Harmonic Analysis, 2005, 19(3): 340-358
- [10] 彭坤杨,董兰芳. 一种基于图像平均灰度值的快速图像修复算法 [J]. 中国图象图形学报, 2010, 15(1): 50-55
- [11] 胡文瑾,王维兰,刘仲民. 一种基于样本块的快速图像修复算法 [J]. 数据采集与处理, 2011, 26(6): 626-630
- [12] 何凯,焦青兰,孟春芝,等. 非均匀纹理图像大区域修复算法 [J]. 天津大学学报, 2012, 45(4): 314-318
- [13] 王孝青,党亚民,成英燕. 基于矩阵相似度的 InSAR 图像配准方法研究 [J]. 测绘科学, 2008, 33(6): 44-46
- [14] 张成,杨海蓉,沈川,等. 循环-循环块相位掩膜矩阵压缩双透镜成像 [J]. 光电子·激光, 2012, 23(1): 0174-0179