

基于轮廓 - 纹理分解的图像修补技术研究

庄红林¹, 施国兴¹, 范菁², 赵艳芳¹

(1. 云南民族大学 数学与计算机科学学院, 云南 昆明 650031;

2. 云南民族大学 物理与电子电气信息工程学院, 云南 昆明 650031)

摘要: 研究了传统整体变分去噪算法和图像修补算法, 提出了一种基于轮廓 - 纹理分解的图像修补算法. 算法首先将待修补图像分解为轮廓结构图像和纹理细节图像. 再对轮廓结构图像的空缺进行轮廓结构修补, 并对纹理细节图像的空缺进行纹理合成. 最后将修补后的轮廓结构图像及纹理合成后的纹理细节图像进行合成, 得到需要的修补图像. 这种方法能够很好地修补图像空缺部分的轮廓结构及纹理细节. 实验结果表明, 该算法比纯结构图像修补法或纯纹理合成法要好.

关键词: 图像修补; 图像分解; 纹理合成

中图分类号: TP391.41 **文献标识码:** A **文章编号:** 1007 - 855X(2008)03 - 0057 - 05

Studies on Image Inpainting Technology Based on Contour - Texture Decomposition

ZHONG Hong-lin¹, SHI Guo-xing¹, FAN Jing², ZHAO Yan-fang¹

(1. School of Mathematics and Computer Science, Yunnan Nationalities University, Kunming 650031, China;

2. School of Physics and Electronic Engineering, Yunnan Nationalities University, Kunming 650031, China)

Abstract: By studying the principle and application of total variation de-noising model and image inpainting, an image inpainting method based on contour - texture decomposition is proposed. In this method, an image is first decomposed into two parts: contour and texture image, which are inpainted respectively. Finally, the two inpainted images will be synthesized into one image. It is proved through the results that this method can better inpaint images.

Key words: image inpainting; image decomposition; texture synthesis

0 引言

所谓图像修补技术就是针对图像中遗失或者损坏的部分, 利用未被损坏的邻域信息, 按照一定的规则填补, 使修补后的图像接近或达到原图视觉效果的一种专门技术. 由于图像修补技术可安全有效地恢复损坏的艺术作品, 可去除图像中文字或者其他不期望的物体, 可应用于视频点播, 并可对网络传输中丢弃或者损坏的视频信息进行修补从而改善观看质量. 因此, 图像修补技术得到广泛地研究和应用.

目前, 有众多关于图像修补技术的研究, 具有代表性的图像修补算法有 Bertalmio 等人提出的基于高阶偏微分方程的算法^[1], Efros 提出的基于纹理生成的修补方法^[2], Masnou 等人使用等照度线的方法^[3], Levin 等人提出的基于概率的修补方法^[4], Chan 等人基于整体变分模型的修补方案^[5]. 这些方法中, 基于纹理生成的修补方法对结构信息的修补能力有限; 使用等照度线的方法抗噪声能力比较弱, 对曲线及复杂

收稿日期: 2007 - 02 - 25. 基金项目: 云南省教育厅自然科学基金和云南民族大学青年基金科研项目资助 (项目编号: 6Y0006D, 200610).

第一作者简介: 庄红林 (1972 -), 男, 硕士, 讲师. 主要研究方向: 智能信息和图形图像处理.

E-mail: zhlm@hotmail.com

结构修补效果不太理想;基于概率的修补方法在使用前需预先选择训练区域,对训练区域有较高要求,实际应用受限;基于整体变分模型的修补方法对参数的选择比较敏感,且计算量较大。

通过研究已有图像修补算法,提出了一种基于轮廓图像分解的修补算法,实验结果表明,该算法能够有效恢复图像缺失部分的轮廓及相应的纹理细节。

1 算法思想

Rudin, Osher, Fatemi 三人观测到带噪图像整体变分比无噪图像明显地大,并首次将整体变分方法引入图像处理领域^[6],目前该模型已经在图像处理方面取得了广泛应用,其应用领域已经从最初的图像去噪扩展到图像去模糊、图像分解、图像修补等方面。整体变分的数学模型(简记为 ROF 模型)可用下式表示:

$$\min_I TV(I) \text{ 服从于 } I - I_0 - n^2 = 0 \quad (1)$$

在式(1)中,有:

$$TV(I) = \int |\nabla I| dx dy = \int \sqrt{I_x^2 + I_y^2} dx dy \quad (2)$$

其中, I 表示恢复图像, I_0 表示带噪观测图像, n^2 表示图像中噪声分布, $TV(I)$ 表示图像的整体变分。式(2)等价于下式:

$$\min_I \{ TV(I) + \frac{1}{2} \int (I - I_0 - n^2)^2 dx dy \} \quad (3)$$

在 ROF 整体变分模型中, λ 扮演了一个重要的尺度参数作用。通过调节 λ ,能够在恢复结果中获得期望的不同尺度的图像信息。从这个角度看,类似于非线性扩散去噪模型中尺度空间理论用到的时间变量。从几何意义上看, λ 决定了去噪过程将保留何种尺度的图像特征。因此,尺度参数能够用来进行多尺度图像分解:不同尺度上的图像特征将被使用不同参数值 λ 的 ROF 整体变分模型进行分离。这说明可以利用 λ 的特性对图像进行分解,根据欲修补图像的特征,选取适当的规整化参数值,将整体变分算法作用于图像,结果将是一个尺度图像,该尺度图像只包含原图像的尺度(轮廓)信息,纹理细节信息将丢失。若单独对这个尺度图像进行修补,修补算法选用已有的图像轮廓修补算法,能够有效地恢复出原图像中缺失部分的轮廓。

目前修补出的缺失部分只有轮廓,没有纹理细节,可能跟周围的邻域存在反差(如果原图像是无纹理细节的图像,则不存在此问题)。为了获得缺失部分的纹理信息,可将原图像与前面得到的轮廓尺度图像进行差运算,得到一幅含有纹理细节,不含图像轮廓的残差图像,对残差图像进行纹理合成,把缺失部分邻域的纹理用一定的方法填充进去,从而得到一个完整的纹理图像。最后,把恢复出的尺度图像与纹理图像合成,得到结果。

整个处理过程有 3 个关键操作:图像分解、图像(结构)修补和纹理合成,以下分别介绍这 3 种技术,每一个操作都将产生需要的中间结果,这些结果对从不同的角度观察图像是很有意义的。

2 图像分解

图像分解是这 3 个处理过程中最关键的一个,因为图像结构修补和纹理合成处理的图像依赖于分解结果。这里用到两种图像分解技术,一种是基于尺度的整体变分模型^[6]。根据所要取得的图像尺度,选取适当的规整化参数,其选取的依据是大尺度图像对应大的规整化参数,小尺度图像对应小的规整化参数值。另一种是采用 Vese 提出的图像分解算法^[7],这种分解方法引入了 Y. Meyer 提出的振荡函数空间来表示纹理^[8],能够更好地将纹理与轮廓结构分离,为了在图像修补中得到更好的效果,采用此算法来分解图像。

Vese 提出的图像分解算法是由整体变分去噪方法发展起来的,与整体变分去噪算法不同的是引入了振荡函数空间来模型化纹理和噪声。

设 $I: R^2 \rightarrow R$ 表示观测到的真实图像, $I \in L^2(R^2)$ 是进行图像分解的对象, 可以带有噪声. u 表示分解 I 后得到的结构或轮廓图像, v 表示分解 I 后得到的纹理细节图像 (可能有噪声), I, u 和 v 之间存在一种线性关系, 即:

$$I(x, y) = u(x, y) + v(x, y)$$

则整体变分模型可变换为:

$$\inf_{u \in BV} \{ E(u) = \lambda \int |\nabla u| + \frac{\alpha}{2} \int v^2; I = u + v \} \tag{4}$$

在式 (4) 中, BV 表示有界变差函数空间. 式中第 1 项是规整化项, 起到移除噪声和纹理细节的作用, 第二项是保真项, $\lambda > 0$ 是规整化参数, 起到调节两项的作用.

震荡函数模型适于表示重复模式的信息, 而纹理细节恰恰又是一种重复模式的信息, 由此, Meyer 引入了震荡函数模型表示纹理细节, 但引入振荡函数模型后, 式 (4) 的求解就必须在两个函数空间中进行, 因为 u 属于 BV 函数空间, 而 v 属于振荡函数空间.

3 纹理合成

第 2 个关键技术是纹理合成. 使用它来填充 v 中缺失的纹理信息. 这里选取 Efros 提出的纹理合成算法^[2], 它对真实纹理图像能产生很好的合成效果. 其算法思想为:

设在 v 中被填充的区域为 Ω . 纹理合成是从 Ω 的边界 (记为 ∂) 开始逐个像素向内填充的. 设 I_i 表示一模板, 里边的像素已知, $p(i, j)$ 是与它相邻的点, 且 $p(i, j)$ 是一个待填充的像素点. 在 v 中查找一组可能的模板, 从中发现与距离 $d(I_i, \hat{I}_i)$ 最近的一个 (距离可以是事先设定的一个阈值). 在文献 [2] 中, d 是一个归一化的差距平方和 (SSD). 一旦找到一组符合要求的 \hat{I}_i , 从中随机选择一个, 并取对应位置上 $p(x, y)$ 的值作为 I 对应的 $p(x, y)$ 的值, 这样就能完成一个像素 $p(x, y)$ 的填充. 纹理合成算法具体过程如图 1 所示.

模板 I_i 可以是简单的取图 1 所示的种子块. 那么在图像 v 中, 要查找所有与 I_i 相接近的 3×3 的块 (距离 d 小于预定义阈值即接近), 然后随机选取 1 个, 用其对应位置上 $p(x, y)$ 值代替缺损部分中对应于 I_i 的像素值, 如此循环, 直到缺损部分全部被填充为止.

4 轮廓结构修补

采用 Bertalmio 提出的算法来实现对轮廓结构图像 u 的修补^[1]. 设 Ω 表示待修补区域, ∂ 表示它的边界. 图像修补算法的基本思想就是沿等照度线方向光滑地推进环绕待修补区域 Ω 的信息到 Ω 中, 在这里, 像素灰度值及等照度线方向都被推进到区域 Ω 中, 如图 2 所示. 这种推进类似于热扩散过程, 可以用一个偏微分方程来描述, 如下所示:

$$\frac{\partial I}{\partial t} = -(\nabla \cdot g) - I \tag{5}$$

其中, t 是人为引进的一个步进时间参数, ∇ , $\nabla \cdot g$ 分别表示图像的梯度、散度及垂直于梯度 (等照度方向) 的算子. 方程只在待修补区域 Ω 中求解, 并在边界 ∂ 上要有适当的边界条件值 (灰度值及等照度线方向).

在求解时注意达到平稳状态时, 有 $\frac{\partial I}{\partial t} = 0$, 即 $(\nabla \cdot g) - I = 0$, 就意味着在等照度线方向 I 上 I 是一个常量. 因此, 在待修补区域要完成的是一个光滑连续的 Laplacian 扩散.

5 实验分析与讨论

实验 1: 图 3 为基于分解的算法在修补过程中每一步骤的状态.

a 为原始图像, 图中白色粗线为待修补区域. c, d 分别为分解后得到的轮廓结构图像及纹理细节图

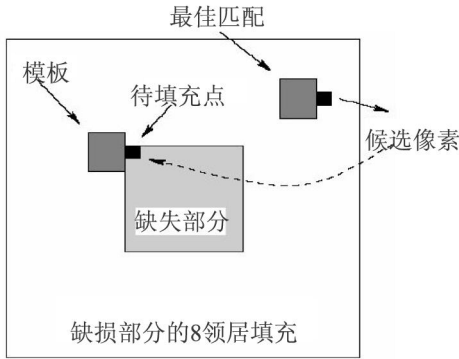


图1 纹理合成
Fig.1 Texture synthesis

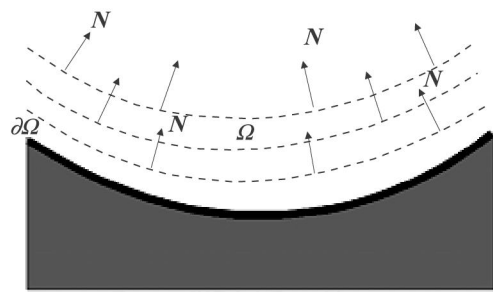


图2 图像修补
Fig.2 Image inpainting

像,从图中可以看出,在轮廓结构图 c 中含有图像中物体的轮廓结构,没有明显的纹理特征,纹理特征被分解到了纹理细节图 d 中.如 c 中人物膝盖及桌布一角,本来是含有丰富纹理的,现在基本没有了.而 d 图中,只有纹理,没有物体的轮廓结构,如原图中的桌脚,在 d 图中基本看不到,它的主要信息包含在 c 图中.这说明图像分解算法达到了预期的效果.这一步很重要,因为它是下面修补及纹理合成工作的基础.

e图是采用图像修补算法对轮廓结构图像修补后的结果,可以观察到桌脚及桌布的边缘,都得到了很好的恢复; f图是采用纹理合成图像进行合成的结果,在富含纹理的地方,如桌布及膝盖待合成的区域,纹理特征都得到了很好的恢复.

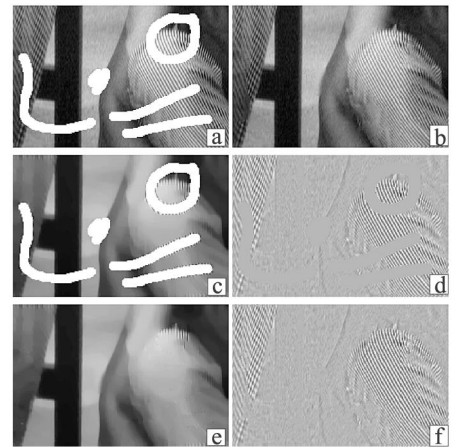
最后来看合成后的结果,即 b 图,它是将 d, e 两图合成后得到的.从图中可以看出,待恢复区域的结构及纹理都表现得很好,与周围的区域从视觉上看不出差别,特别是膝盖上纹理,与周围的纹理接合得非常好,没有错位的地方.

实验 2:图 4 为基于分解的算法与 Efron 纯纹理算法及 Bertalmio 纯修补算法比较结果.

从 i 图纯纹理合成算法修补的结果可以看出,纯纹理合成算法在恢复出待修补区域中海水的同时,产生了一些人工的修补痕迹,且不能很好地合成带有结构性质的区域,如海堤及海堤下石头的信息,就没有很好地恢复.同样, j 图所示纯结构修补算法虽然很好地恢复出了海堤及海堤下石头的信息,但恢复出海水的部分,却是非常模糊.而基于分解的算法恢复出的结果 (h 图)却能在修补出海水信息的同时,很好地修补出海堤及石头的信息,而且海水信息比单纯使用纹理合成技术得到的结果要好,同样,海堤及石头的信息也比单纯使用结构修补技术得到的结果好.

6 结论

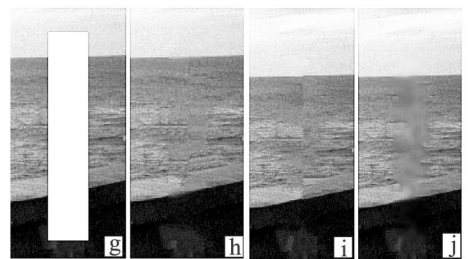
实验结果表明,基于分解的算法比纯纹理合成及纯结构修补技术要好.这主要是由于算法在修补的过程中,同时考虑了原图像的纹理信息及轮廓结构信息,用待修复区域邻域的纹理信息及结构信息按一定的模式来对待修复区域进行填充.而纯



(a) 原始图像(白色粗线为待修补区域);
(b) 最终修补结果(由图c图d合成);
(c) 由原始图像分解得到的轮廓结构图像;
(d) 由原始图像分解得到的纹理细节图像;
(e) 纯修补算法对图c修补后的结果;
(f) 纯纹理合成算法对图d合成后的结果.

图3 基于轮廓-纹理分解的图像修补算法的修补过程

Fig.3 Image inpainting procedure based on contour edge and texture segmentation



(g) 待修复图像,图中白色矩形为待修补区域;
(h) 本算法修补结果.
(i) 纯纹理合成算法修补的结果;
(j) 纯结构修复算法修补结果.

图4 本文算法与Efron纯纹理算法、Bertalmio纯修补算法的修补效果比较

Fig.4 The results of this algorithm compared with Efron's and Bertalmio's algorithms

纹理合成技术仅仅考虑了纹理方面的信息,没有很好地考虑图像待修补区域的结构与周围邻域可能的关系.同样,纯结构修补技术能够很好地修补待修补区域的结构信息,但它没有考虑更多的纹理信息,所以恢复出来图像,虽然结构出来了,但感觉与邻域反差过大,这一点在纹理丰富的自然图像中尤其明显.这里需要指明的是,如果原图像不含任何纹理的简单轮廓结构图像,那么纯结构修补出的图像应与本算法修补的图像一致.

算法还有可改进的地方,首先由于该算法是建立在图像纹理轮廓分解的基础之上,所以找到一种更有效的图像分解方法来分解待修补图像,对修补结果是非常有帮助的.另外,就是虽然该算法容许噪声存在,并有一定的去噪能力,但分解后纹理细节图像中包含一定的噪声,如果不能很好地分离纹理噪声,最后合成的图像仍然会含有一定的噪声.

参考文献:

- [1] Bertalmio M, Sapiro G, Caselles V. Image Inpainting[C]// Proceedings of International Conference on Computer Graphics And Interactive Techniques. New Orleans, Louisiana, USA, 2000.
- [2] Efros A A, Leung T K. Texture Synthesis by Nonparametric Sampling. IEEE International Conference on Computer Vision, Corfu, Greece, 1999: 1033 - 1038.
- [3] Masnou S. Disocclusion: A Variational Approach Using Level Lines[J]. IEEE Trans Image Processing, 2002, 11: 68 - 76.
- [4] Levin A, Zomet A, Weiss Y. Learning How to Inpaint from Global Image Statistics[C]// International Conference on Computer Vision, 2003.
- [5] Chan T, Shen F. Mathematical Models for Local Non - texture Inpaintings[J]. SIAM Journal on Applied Mathematics, 2002, 62: 1019 - 1043.
- [6] Rudin L, Osher S, Fatemi E. Nonlinear Total Variation Based Noise Removal Algorithms[J]. Physica D, 1992, 60 (1 - 4) : 259 - 268.
- [7] Vese L A, Osher S J. Modeling Textures with Total Variation Minimization and Oscillating Patterns in Image Processing[R]. UCLA CAM Report, 2002.
- [8] Meyer Y. Oscillating Patterns in Image Processing and Nonlinear Evolution Equations[R]. AMS University Lecture Series 22, 2002.

(上接第 56 页)

该方法的好处是:可以从权威的碑文上得到表示书法汉字间架结构特征的特征结构集,有利于进一步科学的分析该书体的间架结构特征.另外,对于每一个固定的基本部件,运用该算法后提取到的特征结构是相同的,同一个书法汉字的组成部件之间的相对关系也是固定的,提取过程中不受人工的干预,利用这些特征结构,易将一个基本汉字部件根据它的特征重新放到合适的位置上,最终达到用书法汉字基本部件与间架结构特征来生成书法汉字的目的.

参考文献:

- [1] 崔屹. 图像处理与分析——数学形态学方法及应用[M]. 北京:北京科学出版社, 2002.
- [2] Rafael C. Gonzalez, Richard E. Wood. 数字图像处理[M]. 2版. 北京:北京电子工业出版社, 2007.
- [3] Sun Xingming, Chen Huowang, Yang Lihua, et al. Mathematical Representation of a Chinese Character and its Applications. International Journal of Pattern Recognition and Artificial Intelligence, 2002, 16(8): 735 - 748.
- [4] Jang B K, Chin R T. One - Pass Parallel Thinning: Analysis, Properties, and Quantitative Evaluation. IEEE PAMI, 1992, 14(11): 1129 - 1140.
- [5] Choy S S O, Choy C S T, Siu W C. Note: new Single - Pass Algorithm for Parallel Thinning. Computer Vision Image Understanding, 1995, 62(1): 69 - 77, 1387 - 1399.