

基于图像修复技术的压缩方法的研究

王 晨 杜建洪

(复旦大学通信科学与工程系 上海 200433)

摘 要 通过对块状缺损图像修复技术的研究,提出一种改进的纹理合成修复算法。继而依据粗糙度的分析对图像块进行分类,根据修复算法特性人为丢弃部分图像块,并结合 JPEG 算法进行压缩编码。在相近的视觉效果下,可以使图像压缩率得到显著的提高。

关键词 图像修复, 纹理合成, 粗糙度, JPEG, 压缩率

中图分类号: TN919.8

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2006)05-0848-04

Research of Image Compression Based on Image Inpainting

Wang Chen Du Jian-hong

(Department of Communication Science and Engineering, Fudan University, Shanghai 200433, China)

Abstract An optimized approach based on texture synthesis for filling-in blocks of missing data is presented in this paper. According to coarseness analysis and the character of inpainting algorithm, parts of image blocks would be dropped purposively. And then, this method is applied to the second-time image compression along with other compression algorithms such as JPEG, and the compression ratio is highly improved.

Key words Image inpainting, Texture synthesis, Coarseness, JPEG, Compression ratio

1 引言

图像修复技术是利用残留图像信息,针对图像中丢失或者受损部分进行填充和修正,以期实现图像复原,或接近原图像的视觉效果。在特定的条件下,图像修复技术可以有效地恢复损坏的数字图像作品。因此文献[1]中提到,倘若在信息传输过程中人为地丢弃一些符合某种可修复条件的图像信息,就可以实现图像数据量的削减,即实现了信息压缩。在无线信道传输图像时,提高图像信息的压缩率也就提高了无线信道的利用率。

目前在图像压缩领域主要采用的是 JPEG 图像压缩标准,利用将图像分割成的 8×8 像素子块进行离散余弦变换(DCT),量化和可变长编码等技术进行压缩编码。那么,只要图像修复技术以 8×8 像素子块作为处理子单元,就可以将图像修复方法所产生的信息压缩与 JPEG 压缩算法结合起来,实现 JPEG 图像的二次压缩。本文基于图像修复算法的研究,通过对可修复图像块的分析,并且结合 JPEG 压缩算法,尽可能地去掉图像空间及视觉冗余信息,实现信息压缩。通过实验证明,应用如上方法可以在获得相近图像视觉效果的同时,使得压缩率得到了显著的提高。

2 图像修复算法的研究

图像修复技术研究领域主要存在着两种修复算法。一种是纹理合成算法^[2,3],即根据图像纹理的性质,复制具有相似纹理属性的图像块填充到受损区域。另一种是图像扩散修复算法^[4],即根据偏微分方程计算出等照度线传播方向,使信息从图像缺损边缘向内部扩散,完成整个受损区域的填

充。但是两种算法都存在着一些局限性:前者不适用于处理边缘等图像细节;后者容易受到噪声的影响,不适用于处理大块图像缺损区域。然而,当同时应用两种算法进行图像修复时,首先需要判断该缺损区域适用于哪一种算法,要求找到一种能自适应所有图像类型的判断标准,这无疑给图像修复技术增加了难度^[1,5]。

本文对图像纹理合成修复算法进行了深入的研究,使其能够适用于修复各种类型的图像缺损。文献[2,3]中的纹理合成算法之所以不能较好修复图像细节以及大块的缺损区域,就在于其没能最大限度地利用残留图像的信息,也就是说没能解决好图像像素修复次序的问题^[6]。为此,本文引入自定义的权威系数,结合受损区域周围图像块像素值变化的趋势,约束纹理合成修复方向,最终完成图像修复。为了使图像修复算法能够和 JPEG 压缩算法有机地结合起来,将 8×8 像素块作为图像修复的子单元,则在自定义的权威系数计算以及修复方向约束时均以该像素块作为计算单位。

2.1 自定义的权威系数

对缺损图像区域及其邻域的每个 8×8 图像子单元定义权威系数,用来描述该图像块的可信程度,及其对 8 邻域内待修复图像块的影响程度。在缺损区域,如果待修复图像块周围已知信息越多,那么其修复后的准确性就越高,则权威系数越大;反之,如果该像素块权威系数越大,其向邻域传递的相关信息就越多,则对邻域块的影响就越大。所以权威系数大的图像块应被优先修复。设 I , U 分别代表图像区域及残留区域所有块的集合,设 $A(i, j)$ 为权威系数,令残留区域图像块具有最大权威系数为 9,设 $W(i, j)$ 表示该图像块计算权威系数的权重, i, j 表示该图像块在所有图像块中的位置,则从边缘顺次计算权威系数算法如下:

(1) 初始化: 如果 $(i, j) \in U$, 则 $A(i, j) = 9$, 否则 $A(i, j) = 0$; 如果 $(i, j) \in U$, 则 $W(i, j) = 1$, 否则 $W(i, j) = 0$;

(2) 如果 $(i, j) \in I - U$, 则 $Sum = \sum_{k=i-1}^{k=i+1} \sum_{g=j-1}^{g=j+1} (A(k, g) \cdot W(k, g))$, $N = \sum_{k=i-1}^{k=i+1} \sum_{g=j-1}^{g=j+1} W(k, g)$; 定义 $A(i, j) = \frac{Sum}{N} \left(1 - \frac{1}{N} \right)$;

(3) $U = U \cup (i, j)$, $W(i, j) = 1$;

(4) 如果 $U \neq I$, 继续执行 (2); 否则, 完成权威系数矩阵 A 的计算。

2.2 缺损图像块修复方向的确定

依次选取权威系数大的 8×8 缺损图像块优先进行修复, 在其 8 邻域内像素填充方向可以简单地设定为上下左右 4 个方向。为了使得填充后的图像能够反映出周围图像扩散的趋势, 通过判断该缺失块周围几个方向上最近的已知(或已填充)图像块灰度值的变化, 选取其中梯度变换最缓慢的方向进行填充。将两个像素块对应像素灰度值之差的平方和(SSD)^[2], 记为像素块距离 d , 作为衡量梯度变化的标准。为了提高准确性, 每填充完一行(或一列), 重新计算下一次填充的方向(将新填充的像素值计算在内), 直到行填充移动的标志 M_x (或者列填充移动的标志 M_y) 等于图像块的高(或长)为止。设待填充图像块为 Ω , 3×3 像素块模板变量为 I_x , 算法描述如下:

(1) 查找待填充图像块最近的 8×8 已知块或已填充块, 以相对位置记为 $I_{up}, I_{down}, I_{left}, I_{right}$; 相应图像块上提取的 3×3 像素块模板依次记为 I_u, I_d, I_l, I_r ;

(2) 如果 $d(I_{up}, I_{down}) < d(I_{left}, I_{right})$, 执行(3); 否则, 执行(4);

(3) 如果 $A(I_{up}) > A(I_{down})$, 则从上到下填充一行 ($I_x = I_u$); 否则, 从下到上填充一行 ($I_x = I_d$)。 $M_x = M_x + 1$ 。 执行(5);

(4) 如果 $A(I_{left}) > A(I_{right})$, 则从左到右填充一列 ($I_x = I_l$); 否则, 从右到左填充一列 ($I_x = I_r$)。 $M_y = M_y + 1$ 。 执行(5);

(5) 如果 $M_x = 8$ 或者 $M_y = 8$, 则该块填充完毕, 否则, 将新填充的行列计入 $I_{up}, I_{down}, I_{left}, I_{right}$, 循环执行(2)。

2.3 多方向纹理合成选择

在确定了填充方向以后, 就可以在该方向上应用纹理合成算法进行图像修复^[1, 2, 5]。如图 1 所示, I_x 表示为修复受损

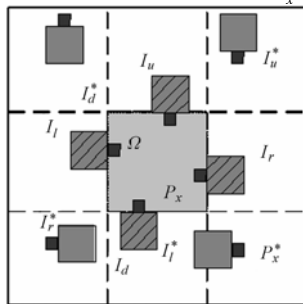


图 1 优化合成算法示意图

Fig.1 Optimized method about texture synthesis

像素 P_x 所选取的模板(根据文献[1,2,5]取 3×3 像素块作为模板), x 表示填充的方向。 I_x^* 表示相应填充方向上与模板 I_x 距离最小的图像块(SSD), P_x^* 为 I_x^* 提取的与 P_x 相对 I_x 位置相同的已知像素, 令 $P_x = P_x^*$, 即完成了该像素点灰度值的合成。

3 丢弃图像块判断依据的研究

人为地丢弃图像块, 就要求该缺损区域必须能够被有效地修复, 以达到原图像的视觉效果。而图像修复在数学上讲本身是一个病态的过程, 其修复数值就是在已知周围像素扩散的基础上对原图像像素值的近似。那么以数据压缩为目的的图像块人为丢弃, 既要考虑到修复算法最佳的适用区域, 又要尽可能地利用人眼视觉特性, 尽量多地削减图像信息量, 以期达到较高的图像压缩率。

3.1 人眼视觉系统(HVS)的分析

通过 HVS 特性, 人眼对不同类型图像区域的敏感程度不同。其中, 对图像平滑区域的噪声最敏感; 对图像的边缘信息较为敏感; 对纹理区域的噪声不敏感。同时人眼对不同灰度具有不同的敏感性, 通常对亮度很高或者很低的区域不敏感。

那么根据HVS特性, 应该在纹理区域以及亮度较高和较低的图像区域尽量多地应用图像修复的算法, 即使填充数据存在着一些偏差, 也不会对视觉效果产生太大的影响。可以用图像块的灰度均值, 熵和方差等统计特性作为HVS特性的分类。对于图像平滑区域, 其方差和熵均较小; 对于图像边缘区域, 其方差和熵均较大; 对于纹理区域, 其方差较小而熵较大。而对于灰度较高和较低的区域我们可以增大灰度值的量化步长, 将其尽可能归入上面的纹理区域。

3.2 修复算法最佳适用图像区域的分析

应用纹理合成算法对图像进行修复, 是以受损区域各个像素完全由周围的已知像素值通过某种扩散关系所决定的假设为基础。又由于计算量上的考虑, 参照文献[1,2,5]选取待填充像素周围某个方向上的 3×3 像素块作为模板, 也就是认为该模板完全决定了此像素值。对受损图像块进行填充次序和方向上的约束, 就是为了提取最准确的 3×3 模板块, 从而提高填充像素值的准确性。

为了与 JPEG 相结合, 所有丢弃图像块都是以 8×8 像素块为子单元。在通常情况下, 如果图像内容子单元小于该丢弃子单元, 由于相关信息的完全缺失, 就很难实现该处图像的修复; 反之如果图像内容子单元大于丢弃子单元, 就有更多可利用信息完成图像修复。

那么根据对修复算法的分析, 在图像平滑区域以及大面积的纹理区域纹理合成算法都能有效地进行图像修复; 而对于图像边缘等较难判断修复方向的区域尽量避免连续图像块的丢弃; 对于包含大部分内容子单元的图像块则不允许丢弃。

3.3 粗糙度描绘子作为判断标准

为了能符合 HVS 以及纹理合成算法对丢弃图像块的要

求,根据文献[7]引入了粗糙度描绘子对所有的 8×8 像素块进行分析。粗糙度定义为一个像素区域内极值个数占整个区域像素个数的百分比。如果一个像素的灰度值既是所在行的极值又是所在列的极值,那么该像素就是这个区域内的一个极值。在图像块 Ω 区域中,对于任意像素点 (i, j) 用 I 表示其灰度值,设 $\{I(i,:)\}, \{I(:,j)\}$ 分别表示 (i, j) 所在行,列的所有像素点灰度值的集合,则当且仅当 $I(i, j) = \min(\{I(i,:)\})$ 或者 $I(i, j) = \max(\{I(i,:)\})$, 并且 $I(i, j) = \min(\{I(:,j)\})$ 或者 $I(i, j) = \max(\{I(:,j)\})$ 成立, $I(i, j)$ 就是 Ω 内的一个极值。(在实际应用中,将对角线极值也计算在内,这样就将平滑区域的极值个数与非平滑区域的极值个数的差值再次扩大了。)

根据粗糙度的定义,平滑图像区域以及纹理区域的粗糙度数值将大于边缘等过渡区域,这就为应用粗糙度进行图像块分类提供了依据;而且经过分析,自然图像以 8×8 图像块为子单元的粗糙度分布是近似的正态分布,这又为我们控制丢弃图像块的数量提供了可能。若以单位图像块极值个数作为 x 值,该极值下图像块个数作为 y 值(极值个数大于 20 的图像块均记作 20),对于 512×512 像素标准图可以得到如图 2 的粗糙度分布。那么丢弃图像块的粗糙度门限值将在峰值的右侧选取。

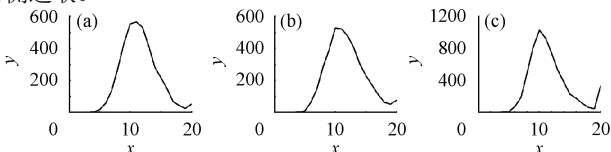


图 2 (a)Lena 粗糙度分布图 (b)Peppers 粗糙度分布图
(c)Goldhill 粗糙度分布图

Fig.2 (a)Coarseness distribution of Lena
(b)Coarseness distribution of Peppers
(c) Coarseness distribution of Goldhill

同时又注意到,单元图像块所含像素个数比较少,其统计特性将存在较大的误差。为了更准确地选取平滑区域以及纹理区域,更好地发挥图像修复算法的作用,就要保证待修复像素周围至少 2 个方向上存在可以决定其数值的 3×3 的图像模板,避免修复错误。为此可以对图像分别进行上下左右的移位,如果在移动 4 个像素后(因为处理对象为 8×8 图像块),该图像块仍旧有 2 次符合设定的粗糙度丢弃标准,则表明其至少在 2 个方向上满足修复条件,那么在进行压缩编码前就可以丢弃该图像块。

4 压缩方法的总体流程

因为椒盐噪声对于极值判断能产生非常大的不良影响,所以在图像处理之前必须将其滤除。另外完成丢弃以后的剩余图像块,可以通过重排列减少丢弃图像区域对周围已知区域 JPEG 直流差分编码的影响,用附加的位置表标识所有丢弃图像块的位置,进一步提高 JPEG 压缩率。在图像修复过程中引入迭代条件,当图像块两次修复值距离(SSD)小于设定的阈值,则认为图像块修复完毕。

综合以上各点考虑,利用图像修复技术以及对图像块粗糙度分类判断,结合 JPEG 压缩编码进行图像压缩,得到压缩方法以及解压缩方法系统流程如图 3,图 4 所示。

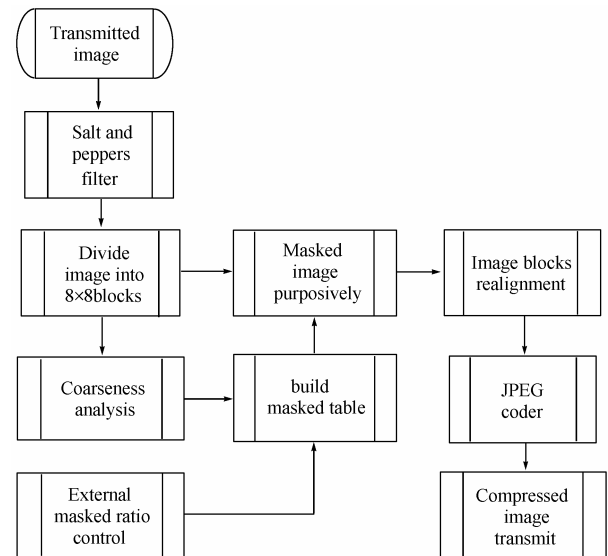


图 3 基于图像修复技术的压缩方法系统流程图

Fig.3 Compression system flow chart based on image inpainting

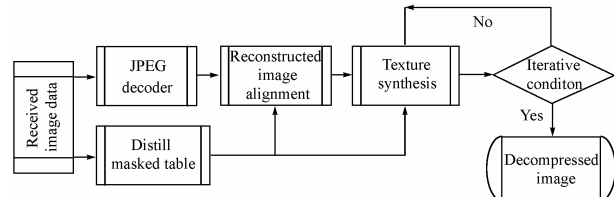


图 4 基于图像修复技术的解压缩方法系统流程图

Fig.4 Decompression system flow chart based on image inpainting

5 实验的结果和数据分析

图 5,图 6 分别是 Lena 和 Goldhill 标准图像经过人为丢弃部分图像块后在接收端输出的恢复图像。通过与仅应用 JPEG 压缩算法生成图像的比较,可见修复图像在主观视觉上与后者非常接近,达到了比较满意的效果。在表 1 中,对应用本文压缩算法处理多幅图像的各项参数进行统计和分析。用 BPP(Bits Per Pixel,每像素比特数),CR(压缩率)进行数据压缩量的比较,用 PSNR(Peak Signal-Noise Ratio)对 JPEG 压缩生成图像及本文算法生成图像质量进行客观评估。根据 JPEG 专家组主观观测结论^[8],当 BPP 约为 1 时 JPEG



图 5 (a)人为损坏的传输图像 Lena (b)修复解压图像输出 Lena
(c)仅应用 JPEG 压缩图像 Lena

Fig.5 (a)Transmitted image Lena masked purposively (b)Decompressed image Lena by inpainting (c)Decompressed image Lena by JPEG alone



图 6 (a)人为损坏的传输图像 Goldhill (b)修复解压图像输出 Goldhill (c) 仅应用 JPEG 压缩图像 Goldhill

Fig.6 (a)Transmitted image Goldhill masked (b)Decompressed image Goldhill by inpainting (c)Decompressed image Goldhill by purposely JPEG alone

压缩图像质量接近与原图像无法区分, 因此本文调节质量系数将应用 JPEG 压缩后的图像 BPP 控制在 1 附近进行数据分析和效果比较。

通过表 1 的统计和分析, 说明结合修复算法的粗糙度控

表 1 图像缺损及压缩数据统计和分析
Tab.1 Statistics of masked image and compression data

图像名称	Lena	Barbara	Goldhill	Jet	Peppers
分辨率(pixel)	512×512	720×560	720×576	512×512	512×512
像块总数(块)	4096	6300	6480	4096	4096
丢块总数(块)	1382	2211	1866	1365	1412
丢弃比率(%)	33.74	35.10	28.80	33.33	34.47
应用 JPEG BPP	0.988	0.971	0.972	0.994	0.963
应用 JPEG PSNR	34.12	30.52	33.53	33.69	35.80
应用 JPEG CR	8.10	8.24	8.23	8.05	8.31
应用本文修复算法 BPP	0.759	0.731	0.778	0.841	0.731
应用本文修复算法 PSNR	34.01	28.27	30.33	32.00	32.93
应用本文修复算法 CR	10.54	10.94	10.28	9.52	10.94
CR 提高(倍)	1.30	1.33	1.25	1.18	1.32
参照文献[1]CR 提高(倍)	1.25			1.12	1.28

参 考 文 献

[1] Rane S, Sapiro G, Bertalmio M. Structure and texture filling-in of missing image blocks in wireless transmission and compression applications. *IEEE Trans. on Image Processing*, 2003, 12(3): 296-303.

[2] Efros A, Leung T K. Texture synthesis by non-parametric sampling. http://citeseer.ist.psu.edu/efros99_texture.pdf, 1999- 09/2003-12.

[3] Efros A, Freeman W T. Image quilting for texture synthesis and transfer. http://citeseer.ist.psu.edu/efros01_image.pdf, 2001-08/2003-12.

[4] Bertalmio M, Sapiro G, Caselles V. Image inpainting. http://mountains.ece.umn.edu/~guille/Papers/Sapiro_paper_1.pdf, 2000-07/2003-12.

制在图像压缩应用中是可行的。利用本文的方法处理图像与仅使用 JPEG 压缩方法比较, 在输出图像主观视觉感受及 PSNR 数值较为相近的情况下, 压缩率均得到了显著的提高。而且对比文献[1]的相关数据, 可见本文方法在压缩率提高倍数上略占优势。

6 结 束 语

本文通过对块状缺损图像修复技术的研究提出了优化的纹理合成算法。并在此算法的基础上引入图像块粗糙度进行分类, 人为地丢弃符合设定条件的图像块。最后结合 JPEG 压缩编码算法实现了图像的二次压缩。通过实验结果的观察和数据分析, 本文的压缩方法在获得良好图像效果的同时可以有效地提高 JPEG 图像的压缩率。

[5] Bertalmio M, Vese L, Sapiro G. Simultaneous structure and texture image inpainting. *IEEE Trans. on Image Processing*, 2003, 12(8): 882-889.

[6] Criminisi A, Perez P, Toyama K. Region filling and object removal by exemplar-based image inpainting. *IEEE Trans. on Image Processing*, 2004, 13(9): 1200-1212.

[7] Karu K, Jain A K, Bolle R M. Is there any texture in the image. *Pattern Recognition*, 1996, 29(9): 1437-1446.

[8] 胡建彰, 李炜, 陈江涛. JPEG—算法与实现. 南京邮电学院学报, 1994, 14(3): 43-50.

王 晨: 男, 1980 年生, 硕士生, 研究方向为无线信道传输图像的修复技术及分类检测等。

杜建洪: 男, 1962 年生, 教授, 研究方向为现代通信系统与理论、信号处理与传输等。