

一种柔化锯齿的超分辨率图像重建方法

李雄宗,李翠华*,张丹莹,张东晓,陈 婧,施 华

(厦门大学信息科学与技术学院,福建 厦门 361005)

摘要: 基于锯齿会导致图像边缘长度增加的认识,通过减小边缘长度来抑制甚至消除图像锯齿,从而达到边缘锯齿被柔化的效果.受图像分割算法几何切的启发,首先提出一种新的图像边缘长度先验模型,该先验模型扩展了几何切的概念,使用全邻域系统,得到一种更具有实际意义的边缘长度的定义.然后把这个先验项连同图像似然项作为超分辨率图像重建的目标函数,并且通过最速下降法来极小化这个目标函数,从而达到减小边缘长度的目的.从实验结果可以看出该边缘长度先验模型具有一定的收敛性,并且边缘锯齿得到显著地柔化,图像变得更加地清晰,产生了良好的视觉效果.

关键词: 超分辨率;锯齿效应;边缘长度;几何切

中图分类号:TP 391.4

文献标志码:A

文章编号:0438-0479(2012)03-0348-05

超分辨率图像重建是从低分辨率图像中恢复出高分辨率图像的过程.这个问题是非适定性问题^[1],也是富有极大的挑战性的问题,特别是当仅有一幅低分辨率图像可使用的时候.本文研究的就是这种情况下的超分辨率图像重建问题.

在数字图像获取过程中,受传感器的采样频率、天气和噪声等多种因素的影响,常获取分辨率比较低的图像.因此,超分辨率图像重建在目标识别、高清电视、军事侦察和卫星图像等领域具有广泛的研究.

当前超分辨率图像重建领域已有不少的研究.由于超分辨率图像重建问题的非适定性,现有的研究方法都要使用某些先验知识作为一个正则项来约束超分辨率重建的过程.当前的先验可以分为 2 种类别,一是基于模型的先验,它们的主要依据是相邻像素具有相同的颜色,使用这种先验的算法有很多,例如双三次插值、凸集投影算法^[2]和最大后验概率算法等^[3],通过这些方法得到的超分辨率图像常会出现一些边缘锯齿;二是基于学习的先验^[4-5],它们认为自然景象的数字图像具有相似性,于是事先建立一个图像字典库,把低分辨率图像分解成许多的小块,接着用这些小块查寻它在库中对应的高分辨率图像块,最后用这些高分辨率图像块合成完整的高分辨率图像,然而这种算法的缺点是很难控制由它引入的边缘锯齿;而基于学习的先验可以借助分类算法来实现^[6],它把低分辨率图像分

解成几种不同类别的图像块,根据不同类别的块使用不同的超分辨率算法进行重建,这种方法可以取得良好的效果,但是算法依赖于分解的准确性,同时框架过于复杂.

在超分辨率图像重建领域,边缘处理一直是许多研究者关注的重点,因为图像的视觉效果很大部分是由边缘表现出来的.其中,张新明等^[7]提出基于多尺度正则化先验的最大后验概率超分辨率复原算法来保持边缘,戴声扬等^[8]提出了 SoftCuts 先验模型,通过这个先验模型来进行柔和处理边缘.

本文重点关注超分辨率图像重建过程中的边缘锯齿现象的处理.受几何切算法^[9]启发,首先利用几何切方法建立一种新的边缘长度先验模型,然后将这个先验项作为超分辨率重建中的目标函数的一个正则项,最后通过极小化这个目标函数来减小边缘长度,这样即有消除部分边缘锯齿的效果,从而得到良好视觉效果的高分辨率图像.而在边缘锯齿被柔化的同时,边缘也得到了明显地增强.

1 边缘长度先验模型

首先简要地介绍用于图像分割的几何切原理,然后由此扩展成本文的边缘长度先验模型.由于边缘的锯齿会增加边缘的长度,因而可以通过这个模型来减小边缘长度,从而达到弱化甚至消除某些边缘锯齿的现象,即通过极小化超分辨率重建的目标函数来获取柔化了锯齿的高分辨率图像.

1.1 几何切

设 $g = \langle V, E \rangle$ 是带权重的网格图,其中, V 是图

收稿日期:2011-11-25

基金项目:国防基础科研项目(B1420110155);国防科技重点实验室基金

*通信作者:chli@xmu.edu.cn

像像素位置的集合, E 是在某种特定邻域系统 N_g 中的边集合. 在 \mathbf{R}^2 上给定一条闭合曲线 C , 假设 E_C 是和曲线 C 相交的边集合, 曲线 C 的几何切定义^[9]如下:

$$|C|_g = \sum_{e \in E_C} \omega_e, \quad (1)$$

其中, ω_e 是边 e 的权重. $|C|_g$ 是网格图与曲线 C 相交的边的权重之和. 网格图 g 的邻域系统是一个向量集合 $N_g = \{e_k | 1 \leq k \leq n_g\}$, 用 ϕ_k 表示边 e_k 相对于 x 轴正方向的角度, 且 ϕ_k 满足 $0 \leq \phi_1 < \phi_2 < \dots < \phi_{n_g} < \pi$, 如图 1 所示.

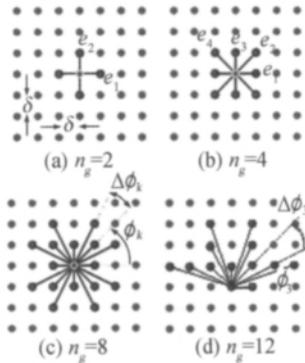


图 1 四种邻域系统

Fig. 1 Four neighborhood systems

在图 1 中, 给定某个邻域系统, δ 是该系统中相邻两点之间的距离, $\Delta\phi_k = \phi_{k+1} - \phi_k$ (设 $\phi_{n_g+1} = \pi$), 于是可以设置网格图 g 中边 e_k 的权重为

$$\omega_k = \frac{\delta^2 \Delta\phi_k}{2|e_k|}. \quad (2)$$

在计算时, 闭合曲线 C 的几何切常用二值特征函数 $B_C(p)$ 表示. 如图 2, 如果点 p 在曲线 C 里面, 则 $B_C(p)$ 的值为 1, 否则 $B_C(p)$ 的值为 0. 曲线的几何切的大小可以表示成下面的公式

$$|C|_g = |B_C|_g = \sum_{k=1}^{k=n_g} \omega_k \sum_{e_{pq} \in N_k} |B_C(p) - B_C(q)|. \quad (3)$$

同时, 假设 $|C|_\epsilon$ 是曲线 C 的几何距离, 可以得到下面的定理^[9].

定理 如果曲线 C 是 \mathbf{R}^2 上一个连续可微的闭合曲线, 与邻域系统中的直线进行有限次数地相交, 那么当 $\delta, \sup_k |\Delta\phi_k|$ 和 $\sup_k |e_k|$ 趋向 0 时, 有

$$|C|_g \rightarrow |C|_\epsilon.$$

此定理说明在一定条件下, 曲线的长度可以近似为它的几何切. 几何切的概念是定义边缘长度的基础, 通过扩展几何切的概念, 本文将在下一小节中给出一种边缘长度的定义.

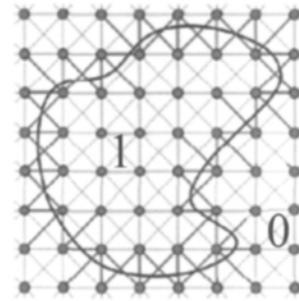


图 2 几何切的二值特征函数 $B_C(p)$

Fig. 2 The binary characteristic function $B_C(p)$ of geometric cuts

1.2 边缘长度先验模型

几何切的定义仅仅适用于二值函数, 为了在图像平面上定义边缘长度, 需要对几何切进行一些扩展.

首先, 本文认为数字图像中的边缘与 \mathbf{R}^2 上的曲线 C 是对应的. 设 I_p 和 I_q 为邻域系统中的像素点 p 和 q 的像素值, μ 是一个阈值, 取值范围为 $\mu \in [1, 255]$, $I_{pq} = |I_p - I_q|$, 那么存在如下结论: 如果 $I_{pq} \geq \mu$, 则存在某条曲线 C 与邻域系统中 e_{pq} 直线相交, 即 p 和 q 之间存在图像边缘.

基于以上的边缘的描述, 本文认为数字图像中的所有边缘都是闭合的. 给定一个阈值 μ_0 和在一个像素点 p_0 , 如图 3 中人物嘴唇的一点 p_0 , p_0 点所在的图像块 X_i 由如下方式确定:

- 1) $p_0 \in X_i$;
- 2) 如果 $p \in X_i, e_{pq} \in N_2$ 且 $I_{pq} < \mu_0$, 那么 $q \in X_i$.

即图像块 X_i 是与 p_0 在邻域系统 N_2 上相连的所有像素点的集合, 其中 X_i 中相连的像素点之间的像素差值小于 μ_0 . 这样, 由于 x_i 是有限集合, 并且 x_i 中的点是连续的, 于是围绕块 x_i 便有一条边缘, 这条边缘是闭合的, 如图 3 所示.

包围图像各个块的边缘各自形成闭合形式, 对于边框处的块, 可以使用循环图像等方式对待.

接着, 给定某一图像 I 、边缘 C 和阈值 μ , 有如下二值函数:

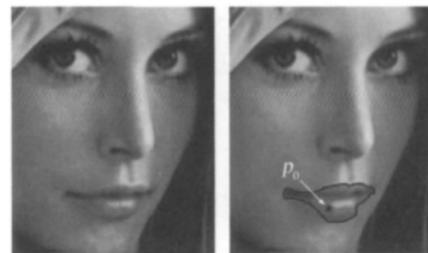


图 3 闭合边缘示意图

Fig. 3 Diagram of closed edge

$$B_C(pq) = \text{sgn}(|I_p - I_q|), \tag{4}$$

其中 $\text{sgn}(|I_p - I_q|)$ 只有 2 个值, 当 $|I_p - I_q| \geq \mu$ 时为 1, 否则为 0. 把式(4)代入式(3)中, 容易得到图像中某条边缘 C 的长度模型, 该模型可以表示如下:

$$|C|_g = \sum_{k=1}^{k=n_g} \omega_k \sum_{e_{pq} \in N_{n_g}} \text{sgn}(|I_p - I_q|). \tag{5}$$

最后, 经分析发现, 在上述边缘长度模型中, 只用到 $1/2$ 的邻域系统, 因此任一条边 e_{pq} 只存在于它的 2 个端点的邻域系统中的其中 1 个, 要么是 p 的邻域系统, 要么是 q 邻域系统. 当然只用 $1/2$ 的邻域系统计算边缘长度是足够的, 但是为了综合考虑 p 和 q 对边缘 C 的共同作用, 本文使用全邻域系统, 这样在计算上只是把与 C 相交的所有 e_{pq} 边上的权重计算了 2 次(如图 2), 因此只需要取最后的边缘长度 $1/2$ 即可.

同时, 因为图像中的边缘可由 $\text{sgn}(|I_p - I_q|)$ 识别, 故可以把一条边缘长度模型推广到整幅图像, 从而得到整幅图像的边缘长度的计算模型如下:

$$|I|_g = \sum_{C \in I} |C|_g = \sum_{p \in I} |C|_g = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^{k=2n_g} \omega_k \text{sgn}(|I - (I)^k|), \tag{6}$$

其中 I 为初始图像, $(I)^k$ 为 I 按 e_k 方向平移 $|e_k|$ 长度之后的图像.

至此, 图像边缘长度先验模型已经建立完成. 这个先验从几何切中扩展出来, 它把半邻域系统换成全邻域系统, 达到综合一条边的 2 个端点的共同作用, 因而更加符合图像处理的实际意义. 同时, 它并不需要把每条边缘的长度逐个计算, 而是把图像作为一个整体来处理, 从而省略边缘提取等相关复杂过程.

2 图像的超分辨率重建过程

在理论形式上, 低分辨率图像是从高分辨率图像经过天气模糊、运动模糊、相机模糊等影响后, 通过下采样得到的. 本文把天气模糊等影响简单化成空域上一个滤波器 G , 于是低分辨率图像获得的模型如下:

$$I^l = (I^h * G) \downarrow + n, \tag{7}$$

其中, I^l 为低分辨率图, I^h 为高分辨率图像, $*$ 是卷积运算, \downarrow 是下采样运算, n 为噪音. 超分辨率图像重建正是这个模型的逆过程.

接着, 本文直接把边缘长度先验项运用到超分辨率重建问题中, 这样可得到超分辨率重建的目标函数如下:

$$I^h = \arg \min_I (d(I^l, I) + \lambda |I|_g), \tag{8}$$

其中, $d(I^l, I) = \|I^l - (I * G) \downarrow\|_2^2$ 是图像的似然项,

是给定低分辨率图像 I^l 与高分辨率图像 I 进过下采样后图像的 L^2 范数的平方; 而 $|I|_g$ 就用公式(5)定义的边缘长度先验项; λ 是一个参数, 它的作用是调整相似项和先验项的比例.

本文使用最速下降法对这个目标函数进行迭代优化, 迭代计算公式如下:

$$I^{t+1} = I^t - \beta(I_{\text{com}} + I_g), \tag{9}$$

其中:

$$I_{\text{com}} = ((I^t * G) \downarrow - I^t) \uparrow * G, \tag{10}$$

$$I_g = \lambda \sum_{k=1}^{2n_g} \omega_k (I \text{sgn} - (I \text{sgn})^k), \tag{11}$$

$$I \text{sgn} = \text{sgn}(I^t - (I^t)^k), \tag{12}$$

式中 I^{t+1} 和 I^t 分别是第 $t+1$ 次和第 t 次迭运算之后的高分辨率图像; β 是下降步骤; \uparrow 是上采样操作, 采用双三次插值来实现; \downarrow 是下采样操作; I_{com} 是 $d(I^l, I)$ 的导数, 其中导数的系数已综合到 β 中, 它的作用与后投影算法的更新函数等效, 为重建误差, 通过引入这个相似项可以有效地保持边缘的硬约束条件; $*$ 是卷积运算; $(M)^k$ 操作表示把矩阵 M 按给定邻域系统的 e_k 方向平移之后的矩阵, M 为 I^t 或者 $I \text{sgn}$; I_e 是公式(5)定义的边缘长度先验的导数, 式(11)的每一项会产生一个 $+\omega_k$ 或者 $-\omega_k$, 符号由 sgn 函数决定, 它有效地修补了边缘, 从而柔化了边缘锯齿. 在本文实现中, 迭代的初始高分辨率图 I^0 采用双三次样条插值方法获得.

3 实验结果与分析

本文主要做了 3 组实验, 实验结果为图 4~7 所示, 分别从边缘长度迭代收敛性、灰度图像效果和彩色图像效果 3 个方面进行说明. 3 组实验放大倍数都为 3×3 , 进过多次实验, 选择共同参数为 $n_g = 12, \mu = 10, \beta = 1$, 而本文中的重要参数 λ 和迭代次数是不同的.

本文选择与双三次插值和 PhotoZoom Pro 4 的结果进行比较, 其中, 双三次插值是超分辨率领域中最典型的算法, 由它处理之后的效果会比一般的插值方法(如最近邻点插值算法)好; PhotoZoom Pro 4 是国际上优秀的图像处理软件, 它的超分辨率算法也是很优秀的, 因而本文既和经典的算法进行了比较, 也和国际上现有的优秀算法进行比较.

图 4 表明, 随着迭代的进行, 边缘锯齿得到显著柔化, 图像变得越来越清晰. 图 5 表明, 在迭代过程中, 本文的先验项是收敛的. 在前 20 次迭代, 边缘长度迅速减小, 表明锯齿得到快速的柔化, 当迭代大于 100 次时, 边缘长度变化很平缓, 表明本文的算法具有一定的

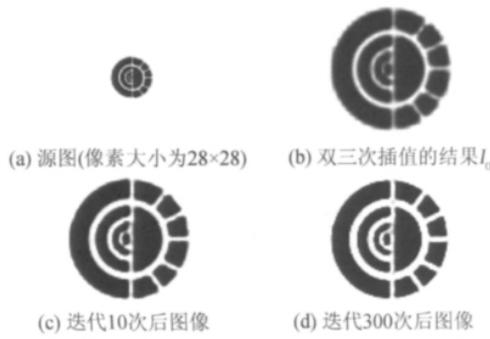


图 4 迭代过程图像

Fig. 4 Images in iterative process

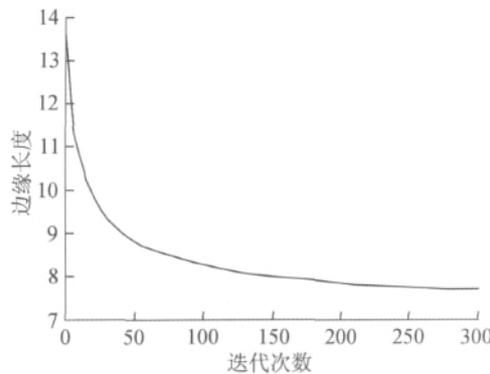


图 5 迭代过程中图像边缘长度变化情况($\lambda=0.001$)

Fig. 5 The edge length variation in iterative process

收敛性。从中间结果看,图像边缘的锯齿随着迭代次数的增加在慢慢消失,到最后边缘变得非常平滑,锯齿得到了显著抑制,图像也得到了明显增强。

图 6 处理的是灰度图像。本实验测试了各种类型的图像,它们有标识图、漫画图和自然图片,从结果可以看出,本文的算法所得到的效果要明显地好过双三次样条插值算法的结果,它的锯齿得到了显著地柔化,并且在抑制锯齿的过程中图像的对比度也得到明显提高。在实验过程中,处理人造图时的参数 λ 可以比处理自然图像时的 λ 大,因为漫画等人造图的锯齿原本



图 6 三组灰度图像的超分辨率重建实验

Fig. 6 Three groups of super-resolution reconstruction experiment for gray-scale image

就会比较少,所以可以减弱边缘长度先验项的影响。但是在柔化边缘锯齿和增强对比度的同时,也会引起色彩略微失真,这个是本文方法的一个局限之处。

图 7 是彩色图像的超分辨率重建实验,其中图 7 (a)的像素大小为 96×121 ,图 7(d)选取 $\lambda=2$ 迭代次数 10 次。对于彩色图像,本文使用同样的参数对它的 RGB 颜色空间的 3 个通道分别进行上述算法。通过和双三次插值、SoftCuts^[8] 算法得到的结果对比,可以看出本文算法对彩色图像同样取得了更好的视觉效果,特别表现在蝴蝶的斑纹更加清晰和脉络更加明显。但是与商业软件 PhotoZoom Pro 4 对比,本文算法的结果虽然在亮点区域取得一定优势,但是还存在改进空间,主要因为彩色图像不同于灰度图像,彩色图像的边缘是由 3 个通道共同作用的,因此对彩色图像的 3

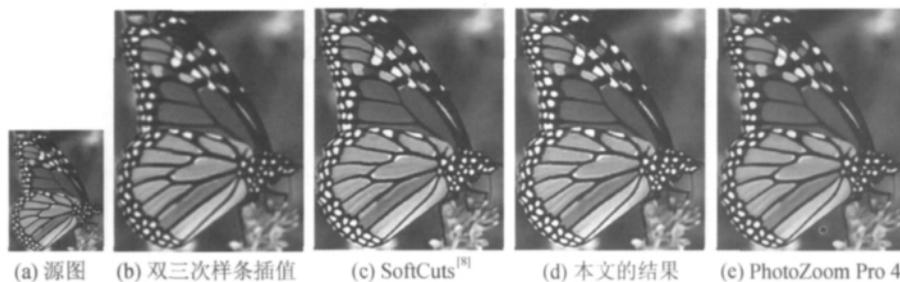


图 7 彩色图像的超分辨率重建实验

Fig. 7 Super-resolution reconstruction experiment for color image

个通道分别独立处理的做法显得不是很合理,这也是本文后续工作的重点.

4 结 论

本文考虑锯齿会增加边缘的长度,首先提出了一种新的边缘长度的先验模型,它可以有效地计算出整幅图像的边缘长度.然后把这个边缘长度先验项合成到超分辨率的目标函数中,通过极小化运算来减少边缘长度,从而达到柔化锯齿效果.最后,本文做了丰富的实验,实验结果表明,本文所提出的算法可以显著地柔化图像的边缘锯齿,明显地增强图像的对比度.此外,本文还提出了后续工作主要在于如何优化彩色图像锯齿柔化算法.

参考文献:

- [1] Baker S, Kanade T. Limits on super-resolution and how to break them[J]. IEEE Trans Pattern Anal Mach Intell, 2002, 24(9): 1167-1183.
- [2] Patti A, Altunbasak Y. Artifact reduction for set theoretic super resolution image reconstruction with edge adaptive constraints and higher-order interpolants[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2001, 10(1): 1167-1183.
- [3] Chantas G, Galatsanos N, Woods N. Super-resolution based on fast registration and maximum a posteriori reconstruction[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2007, 16(7): 1821-1830.
- [4] Sun Jian, Zhu Jiejie, Marshall F. Context-constrained hallucination for image super-resolution[C]//Computer Vision and Pattern Recognition. Xi'an, China: IEEE, 2010: 231-238.
- [5] Daniel G, Shai B, Michal I. Super-resolution from a single image[C]//International Conference on Computer Vision. Kyoto, Japan: IEEE, 2009: 349-356.
- [6] Su H, Tang L, Wu Y. Spatially adaptive block-based super-resolution[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2012, 21(3): 1031-1045.
- [7] 张新明, 沈兰荪. 基于多尺度边缘保持正则化的超分辨率复原[J]. 软件学报, 2003, 14(6): 1075-1081.
- [8] Dai Shengyang, Han Mei, Xu Wei, et al. SoftCuts: a soft edge smoothness prior for color image super-resolution[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2009, 18(5): 969-981.
- [9] Yuri B, Vladimir K. Computing geodesics and minimal surfaces via graph cuts[C]//International Conference on Computer Vision. Nice, France: IEEE, 2003: 26-33.

A Method of Softening the Jagged in Image Super-resolution Reconstruction

LI Xiong-zong, LI Cui-hua*, ZHANG Dan-ying,
ZHANG Dong-xiao, CHEN Jing, SHI Hua

(School of Information Science and Technology, Xiamen University, Xiamen 361005, China)

Abstract: Based on the knowledge that the jagged will increase the length of edge, this paper suppressed or even eliminated the jagged by reducing the length of the image's edge, so as to achieve the effect of softened jagged edges. Inspired by an image segmentation algorithm, the geometric cuts, this paper proposed a new priori model of the edge length firstly, which extended the concept of geometric cuts, used the whole neighborhood system, and got a more meaningful definition of the edge's length. Then the priori term together with likelihood term formed the objective function of the image super-resolution reconstruction, and minimized by the steepest descent method, in order to achieve the purpose of reducing the length of the edges. Finally the results presented in this paper can show the convergence of the priori model, jagged edges are softened significantly, the images become more clearly, and have good visual effect.

Key words: super-resolution; jagged effect; edge length; geometric cuts