

基于各向异性 MRF 建模的多帧图像 变分超分辨率重建

邵文泽, 韦志辉

(南京理工大学计算机科学与技术学院, 江苏南京 210094)

摘 要: 本文首先研究设计出结构自适应的各向异性数字滤波器, 同时导出广义各向异性 MRF (Markov Random Field) 图像模型. 它继承了各向异性数字滤波器的滤波性能, 是对双边全变差模型以及经典 MRF 模型的有效改进. 随后, 提出各向异性模型驱动联合估计亚像素运动和高分辨率图像的变分超分辨率重建算法. 实验结果显示, 本文算法具有更优的噪声抑制和边缘保持性能.

关键词: 超分辨率; 图像复原; 各向异性 MRF 模型; 双边滤波; 运动估计

中图分类号: TN911. 7 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2009) 06-1256-08

Multi-Frame Super-Resolution Reconstruction Based on Anisotropic Markov Random Field Modeling

SHAO Wen-ze, WEI Zhi-hui

(School of Computer Science and Technology, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing, Jiangsu 210094, China)

Abstract: A variational super-resolution reconstruction method is proposed. First of all, a kind of structure-adaptive anisotropic filter is designed based on the recently reported bilateral filtering. It is not only edge-preserving but also corner-preserving. Then, an anisotropic Markov random field (MRF) model is deduced, which is the improvement of both the classical MRF and bilateral total variation image models. Driven by the anisotropic MRF model, an edge-enhancing super-resolution algorithm is subsequently proposed, simultaneously estimating the high resolution image and the sub-pixel motion among low-resolution frames. The half-quadratic regularization approach and steepest descent are exploited to solve the corresponding minimization functional. Experiment results demonstrate the effectiveness of the proposed approach, both in the visual effect and the peak signal to noise ratio (PSNR) value.

Key words: super-resolution; image restoration; anisotropic MRF model; bilateral filter; motion estimation

1 引言

超分辨率 (Super-Resolution, SR) 重建是一种由低分辨率 (Low-Resolution, LR) 图像序列重建高分辨率 (High-Resolution, HR) 清晰图像 (或序列) 的复原技术^[1]. 与传统图像复原技术^[2]不同, SR 重建技术充分利用了获取的低分辨率图像序列信息, 并且综合考虑了成像过程中的各种退化因素 (如运动变形, 光学模糊, 低采样率, 随机噪声等), 因而更具广泛性和实用性, 如红外图像、遥感图像等领域.

目前, 国内外已经报道了大量关于 SR 重建技术的研究工作^[1-17]. 特别是近几年, 国外 SR 重建技术又获

得了新的进展, 例如: Nguyen 等^[6,7]分别提出基于多分辨率思想的 SR 重建算法; Kim 等^[8]提出基于边缘增强和各向异性扩散的变分 SR 重建方法; Capel 等^[9]提出基于连续全变差模型的文本图像 SR 重建算法; Farsiu 等^[10]提出基于双边全变差模型的快速鲁棒 SR 重建算法; 另外, IEEE Signal Processing Magazine 最近将 SR 图像重建作为专题进行了特别报道^[11-14]. 国内 SR 重建领域的主要工作有: 韩玉兵等^[15,16]在最大后验概率估计和加权最小二乘的基础上, 提出动态自适应滤波的视频 SR 重建算法; 孟庆武^[17]基于 Gaussian Markov Random Field (MRF) 图像先验模型, 提出一种联合估计帧间位移和高分辨率图像的预估计混叠度 MAP SR 重建算法; 张

收稿日期: 2007-08-27; 修回日期: 2009-02-26

基金项目: 国家自然科学基金 (No. 60672074); 国家高技术研究发展计划 (863 计划) 课题 (No. 2007AA12E100); 江苏省自然科学基金 (No. BK2006569); 教育部博士点专项基金 (No. M200606018)

新明等人^[31]基于 Huber-MRF 图像先验模型,提出一种基于多尺度边缘保持正则化的 MAP SR 重建算法。

鉴于 MRF-MAP 框架在 SR 重建中的灵活性和有效性,本文基于国际上近期报道的双边滤波器^[20],研究设计出一种结构自适应的各向异性数字滤波器,同时导出广义各向异性 MRF 图像先验模型。各向异性模型继承了各向异性数字滤波器优良的滤波性能,是对 Farsiu 等^[10]提出的双边全变差模型以及经典 MRF 模型的有效改进。随后,基于各向异性模型提出联合估计亚像素运动和高分辨率图像的边缘增强 SR 重建算法,并且利用半二次正则化理论和最速下降法求解相应的最小能量泛函。不论是视觉效果还是峰值信噪比,实验结果都验证了本文的 SR 重建算法具有更强的噪声抑制性和边缘保持能力。

2 问题描述

2.1 退化模型的建立

假设低分辨率图像序列中包含 P 帧 $N_1 \times N_2$ 大小的退化图像。超分辨率的任务是重建一幅 $R_1 N_1 \times R_2 N_2$ 大小的高分辨率清晰图像 u , 其中 R_1, R_2 分别为水平方向和垂直方向的分辨率提高因子。对图像 u 按列重新排列后,假设高分辨率图像为 $u = (u_1, u_2, \dots, u_M)^T, M = R_1 N_1 R_2 N_2$, 低分辨率图像序列为 $g_k = (g_{k1}, g_{k2}, \dots, g_{kL})^T, L = N_1 N_2, k = 1, 2, \dots, P$ 。

图像获取是一个相对复杂的过程,精确的退化建模对有效的 SR 重建至关重要,退化模型采用矩阵-向量表达如下:

$$g_k = D B_k M_k u + n_k, k = 1, 2, \dots, P \quad (1)$$

其中, u 表示原始高分辨率清晰图像 (u), g_k 表示第 k 帧低分辨率图像 (g_k), n_k 表示加性随机噪声 (n_k), M_k 表示 g_k 相对 u 的 $M \times M$ 运动变形矩阵, B_k 表示 $M \times M$ 光学模糊矩阵, D 表示 $L \times M$ 下采样矩阵。因此,SR 重建实质上是涉及运动估计、盲恢复、图像建模等的多任务图像处理问题^[11-14]。本文我们特别考虑传感器模糊情形下的 SR 重建问题^[3,15,16,19],对应的图像退化模型表示如下:

$$g_k(i, j) = \frac{1}{q} \cdot \left(\sum_{m=q-i+1}^q \sum_{n=q-j+1}^q (u(i \cos \theta_k - j \sin \theta_k + r_k, j \cos \theta_k + i \sin \theta_k + s_k))_{m,n} \right) + n_k(i, j) \quad (2)$$

其中, q 为水平方向和垂直方向的下采样因子, $R_k = (\theta_k, r_k, s_k)$ 对应第 k 帧低分辨率图像的旋转平移运动参数。

2.2 基于 MRF-MAP 框架的超分辨率重建

同时考虑运动估计与 SR 重建,并令 $H_k = D B_k M_k(R)$, 则退化模型(1)为

$$g_k = H_k(R) u + n_k, k = 1, 2, \dots, P.$$

给定低分辨率图像序列 $\{g_k\}$, 根据 MAP 准则,SR 重建图像可由下式表达

$$\{\hat{u}, \hat{R}\} = \arg \max_{u, R} \left\{ \Pr(u, R | g_1, g_2, \dots, g_P) \right\} \quad (3)$$

假设 u 和 R 相互独立,并且根据 Bayes 公式,式(3)可以展开为如下形式

$$\begin{aligned} \{\hat{u}, \hat{R}\} &= \arg \max_{u, R} \left\{ \Pr(g_1, g_2, \dots, g_P | u, R) \Pr(u) \Pr(R) \right\} \\ &= \arg \max_{u, R} \left\{ \log \Pr(g_1, g_2, \dots, g_P | u, R) + \log \Pr(u) + \log \Pr(R) \right\} \end{aligned} \quad (4)$$

低分辨率图像序列中的随机噪声独立同分布时,式(4)可改写为

$$\{\hat{u}, \hat{R}\} = \arg \min_{u, R} \left\{ - \sum_{k=1}^P \log \Pr(g_k | u, R) - \log \Pr(u) - \log \Pr(R) \right\} \quad (5)$$

运动参数模型 $\Pr(R)$ 的选取由具体应用确定^[1,16]: 在信噪比(SNR)较低或者需要对很多参数估计的情况下,给定一个有效的先验统计模型是十分有益的,例如基于光流估计的 SR 重建^[1];但当信噪比(SNR)较高并且仅需要对较少参数估计时,不需预先给定先验模型或者假定先验模型为常数,如基于刚性图像配准的 SR 重建^[1,18],本文退化模型(2)就是此种情形。SR 图像 u 的先验模型 $\Pr(u)$ 确定为 MRF 模型,服从如下 Gibbs 分布

$$\Pr(u) = \frac{1}{Z} \exp \left\{ - \frac{1}{T} H(u) \right\} = \frac{1}{Z} \exp \left\{ - \frac{1}{T} \sum_c V_c(u) \right\}$$

其中, Z 为归一化常数, T 为关于 u 的温度函数, V_c 为团 c 上关于 u 的函数,所有团 c 组成集合 C 。数据模型 $\Pr(g_k | u)$ 由随机噪声 n_k 的类型确定;特别地,假设 n_k 为零均值高斯白噪声时, $\Pr(g_k | u)$ 即为正态分布,SR 重建问题最终转化为如下最小能量泛函

$$\{\hat{u}, \hat{R}\} = \arg \min_{u, R} \left\{ \sum_{k=1}^P (u \| H_k(R) u - g_k \|^2 + \sum_c V_c(u) \right\} \quad (6)$$

其中, (u) 为正则化参数。因此,式(6)求解的首要问题就是具体确定图像 u 的先验模型。为此,基于国际上近期研究的双边滤波器^[20],本文研究设计出了一种结构自适应的各向异性图像先验模型,对 Farsiu 等^[10]提出的双边全变差模型以及经典 MRF 图像先验模型作了有效的改进。

3 本文的结构保持各向异性数字滤波器

为了叙述的方便,分别给出邻域系统和邻域阶的定义如下:

定义 1(邻域系统) 二维离散网格 S 上的邻域系统定义为 S 的子集族 $N = \{N_a\}_{a \in S}$, 满足:对于任意 $a, b \in S$,

$$(1) a \in N_a;$$

$$(2) b \sim N_a \Leftrightarrow N_b;$$

其中,子集 N_a 称为网格点 a 的邻域,并且对于任意 $b \in N_a$, 简记为 $b \sim a$.

定义 2(邻域阶) 邻域 N_a 的阶为 $s(s \geq 2)$, 当且仅当集合 N_a 的大小为 $(1 + 2(s - 1)) \times (1 + 2(s - 1))$, 并且 $s = 1$ 对应最邻近 4 点邻域.

3.1 双边滤波器研究的简要回顾

近年来, Tomasi 和 Manduchi^[20] 提出的双边滤波器倍受国际研究者的广泛关注^[10, 21, 22, 24]. 与传统数字滤波器^[5, 11]不同的是, 双边滤波器同时考虑邻域像素与中心像素间的几何距离度和灰度相似性度量(两种度量均采用高斯核函数), 对邻域中距离接近和灰度相似的像素赋予较大权重, 反之则赋予较小权重. 正是这种双重异性加权机制(距离各势异性与灰度各向异性)保证双边滤波器的边缘保持性图像平滑. 双边滤波的具体格式为

$$u^{l+1}(x) = \frac{\sum_{y \sim x} w_s(x-y) \cdot w_g(u^l(x) - u^l(y)) \cdot u^l(y)}{\sum_{y \sim x} w_s(x-y) \cdot w_g(u^l(x) - u^l(y))}, x \quad (7)$$

其中, u^l 为数字图像平面, $x = (x_1, x_2)$ 为图像平面中的像素点, 邻域 $y \sim x$ 的阶为 $s \geq 3$, $x - y = (x_1 - y_1, x_2 - y_2)$, 函数 w_s 为几何距离度量, 函数 w_g 为灰度相似性度量, u^0 为初始噪声图像.

目前, 已经有多篇文献报道了关于双边滤波的研究工作. 具有代表性的工作包括: 2001 年, Elad^[21] 证明双边滤波是基于双边加权思想的最小二乘能量泛函在 Jacobi 算法下的单步迭代格式; 2002 年, Barash^[22] 将双边滤波思想分别引入到自适应平滑和各向异性扩散方程^[23], 指出双边滤波中作为灰度相似性度量的高斯核权重实际是各向异性扩散方程的一种边缘停止函数; 2004 年, Farsiu 等人^[10] 基于 Elad 的工作导出一种双边滤波和 l^1 范数耦合的双边全变差模型, 同时提出基于双边全变差模型进行图像的超分辨率重建. 在国内, 2007 年邵文泽等^[24] 基于稳健统计理论和双边滤波思想, 建立鲁棒的图像复原统一能量泛函, 导出一种非线性数字滤波器的统一设计框架. 能量泛函充分融合了双边滤波的双重异性加权机制和稳健函数(robust function)对边缘奇异点的鲁棒处理机制, 具有鲁棒的噪声抑制性和边缘保持能力. 在数字滤波器统一设计框架下, 作者对稳健函数的选取与设计进行讨论, 提出如下边缘保持能力更强的稳健函数

$$f(x) = - \frac{1}{2} \left(1 + \frac{|x|}{\sqrt{1+x^2}} \right) \exp \left\{ - \frac{|x|}{\sqrt{1+x^2}} \right\} + \frac{1}{2} \quad (8)$$

双边滤波器凭借鲁棒的边缘保持性而得到广泛的研究与应用^[20~22, 24~26]. 但是, 数字图像除了含有边缘

结构以外, 还有角型结构及尺度较小的纹理结构, 双边滤波过程没有充分考虑这些重要几何结构的保持. 此外, 经过大量的实验发现, 双边滤波迭代过程在低对比度区域产生明显的阶梯效应. 事实上, 这是由双边滤波本身的性质决定的, 关于这一点将在下文详述. 总的来说, 双边滤波存在以下几点不足:

- (1) 迭代过程中的邻域窗口总是各向同性不变的;
- (2) 忽略如下事实: 边缘结构区域是 1D 的, 而角型结构区域是 2D 的;
- (3) 在低对比度区域产生阶梯效应, 尤其迭代次数较多时, 导致数字图像自然度的降低;
- (4) 没有考虑低对比度区域的结构保持性, 如尺度较小的纹理, 导致数字图像的分片常数性.

基于上述不足, 本文提出一种结构自适应的各向异性数字滤波器, 能够在保持边缘、角型以及细小结构的同时, 明显减少图像低对比度区域中的阶梯效应.

3.2 结构保持的各向异性数字滤波器

数字图像中的每个像素点都有两重属性, 即亮度属性和几何属性. 亮度属性是指数字图像的灰度, 对于灰度图像而言, 每个像素点灰度值的范围都在 0 到 255 之间. 几何属性是指数字图像的局部结构, 具体而言是指, 边缘结构上的像素点具有 1D 方向性, 角型结构上的像素点具有 2D 方向性, 而平坦区域上的像素点没有方向性; 边缘及角型结构上像素点的局部对比度较大, 而平坦区域上像素点的局部对比度较小. 为了设计结构保持的各向异性数字滤波器, 希望对局部邻域里亮度属性和几何属性与中心像素点均相似的像素点赋予较大权重, 反之则赋予较小权重; 同时, 希望平坦区域上像素点的局部邻域阶数大且各向同性(邻域像素整体平均), 边缘结构上的像素点的局部邻域阶数大且各向异性(边缘像素局部平均), 角型结构上像素点的局部邻域阶数小且各向同性(角型像素局部平均). 图 1 给出各向异性数字滤波器在平坦区域(区域 A)、边缘区域(区域 B)和角型区域(区域 C)的邻域示意图.

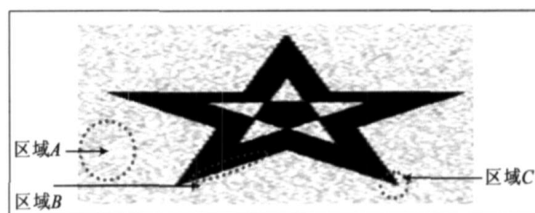


图 1 各向异性数字滤波器在不同性质区域的邻域示意图

首先, 定义亮度属性的相似性度量. 类似双边滤波器的灰度相似性度量, 为了实现各向异性数字滤波器中亮度属性上的鲁棒局部滤波, 根据邵文泽等^[24] 关于非线性数字滤波器统一设计框架的工作, 本文采用稳健函数(8)的影响函数(influence function)作为相似性度量基

函数. 各向异性数字滤波器中的亮度属性相似性度量具体表达如下

$$w_g(u(x) - u(y)) = \exp\left\{-\frac{|u(x) - u(y)|}{g \cdot \max_{y \sim x} |u(x) - u(y)|}\right\} \quad (9)$$

其中, $g \in (0, 1)$ 为控制参数, 邻域 $y \sim x$ 的阶为 $s - 3$.

由于各向异性数字滤波器邻域窗口的大小及形状依赖于中心像素点所属几何结构的性质, 因此必须估计局部几何结构的方向和属性. 目前, 文献报道了多种估计局部几何结构方向的方法, 例如: Bigun 等^[27]将局部结构方向估计归结为 Fourier 变换域中平面最小二乘拟合问题; Weickert^[28]则基于主成分分析 (PCA) 思想提出一种称为结构张量的结构方向估计方法; Feng^[29]进一步耦合 PCA 和 MRA 思想, 提出一种鲁棒性更强的方向估计方法. 通过对各种结构方向估计方法的综合分析, 我们认为 Weickert 的结构张量方法具有最佳的时效性能. 具体地说, 结构张量方法不仅估计精度较高, 而且时间复杂度较低, 同时还能给出几何结构的属性描述子.

结构张量定义为^[28]: $J(\nabla u) = G * (\nabla u \otimes \nabla u) = (J_{m,n})_{m=1,2;n=1,2}$, 其中 u 为图像 u 经过高斯滤波的图像 (方差 > 0), 增强边缘检测的噪声鲁棒性, 减少噪声对求导运算的影响; 对张量 $\nabla u \otimes \nabla u$ 进行高斯滤波 (方差 $= 0$), 以增强结构方向估计的鲁棒性. 矩阵 J 对称且半正定, 存在正交单位特征向量, 分别记为 w 和 \bar{w} . 其中, $w = (2J_{12}, J_{22} - J_{11} + ((J_{22} - J_{11})^2 + 4J_{12}^2)^{0.5})^T$, $\bar{w} = w / |w|$ 指向局部几何结构的最大对比度方向, 称为主向量; 相应地, \bar{w} 指向局部结构的最小对比度方向, 认为是局部几何结构的方向. 它们相应的特征值分别记为 μ 和 $\bar{\mu}$, 定义为 $\mu = (J_{11} + J_{22} + ((J_{22} - J_{11})^2 + 4J_{12}^2)^{0.5})$, $\bar{\mu} = (J_{11} + J_{22} - ((J_{22} - J_{11})^2 + 4J_{12}^2)^{0.5})$. 这两个值可以作为局部几何结构的属性描述子: 在平滑区域, $\mu \approx \bar{\mu} \approx 0$; 在边缘区域, $\mu \gg \bar{\mu} \approx 0$; 在角型区域, $\mu \approx \bar{\mu} > 0$. 因此, $lc(x) = |\mu(x) - \bar{\mu}(x)|$ 可以作为像素点的局部对比度, 其中 x 为图像平面中的像素点.

由上文知, 几何属性的一个重要方面是图像像素点的局部对比度. 在低对比度区域尤其是含有噪声的平坦区域, 采用局部对比度 $lc(x) = |\mu(x) - \bar{\mu}(x)|$ 指示平坦区域比起亮度属性而言对噪声的敏感性较弱. 因此, 通过融合图像局部对比度的相似性度量, 能够调节增大各向异性数字滤波器在低对比度区域中各个邻域像素的权重, 从而减少阶梯效应的产生. 类似式 (9), 为了实现局部对比度上的鲁棒局部滤波, 各向异性数字滤波器中的局部对比度相似性度量具体表达如下

$$w_{lc}(lc(x) - lc(y)) = \exp\left\{-\frac{|lc(x) - lc(y)|}{lc \cdot \max_{y \sim x} |lc(x) - lc(y)|}\right\} \quad (10)$$

其中, $lc \in (0, 1)$ 为控制参数, 邻域 $y \sim x$ 的阶为 $s - 3$.

为实现图 1 所示的各向异性数字滤波, 需定义各向异性的窗口函数. 本文定义如下形式的形状张量 D_s

$$D_s = \frac{1}{2} w \otimes w + \frac{1}{2} \bar{w} \otimes \bar{w}$$

及窗口函数 w_s

$$w_s(x - y) = \exp\left\{-\frac{(x - y)^T \cdot D_s \cdot (x - y)}{r}\right\} \quad (11)$$

其中, w 控制 w 方向窗口函数的尺寸, \bar{w} 控制 \bar{w} 方向窗口函数的尺寸, 分别给出 w 和 \bar{w} 的定义如下

$$w(x) = \frac{r}{1 + r \cdot \frac{cm(x)}{\max_x \{cm(x)\}}} \quad (12)$$

$$\bar{w}(x) = w(x) \cdot \left\{\frac{2\mu}{\mu + \bar{\mu}}\right\} \quad (13)$$

其中, $cm \in (0, 1)$ 为控制参数, 邻域 $y \sim x$ 的阶为 $s - 3$, $r = s - 1$. 此外, $cm(x)$ 表示角形的强度度量, 根据 Shao 等^[30]基于角形增强 PDE 的图像放大工作, 本文给出 $cm(x)$ 的定义如下

$$cm(x) = \left| \left(\nabla \left\{ \frac{w \otimes w}{r} \right\} \right)^T \cdot \nabla u \right| \quad (14)$$

上式定义的角形强度度量具有如下特点: 在角形结构上取值较大, 在边缘结构及平坦区域取值趋于零, 同时对噪声鲁棒. 因此, w 在角形区域的取值较小 ($\ll r$), 而在边缘结构及平坦区域上的取值较大 ($\approx r$). 另一方面, 根据特征值 μ 和 $\bar{\mu}$ 的性质以及式 (12)、(13), w 在边缘结构及角形区域上的取值较小 ($\approx r$), 而在平坦区域上的取值较大 ($\approx r$). 综上所述, 式 (11) 定义的窗口函数具备各向异性, 满足如图 1 所示的各向异性数字滤波的要求.

结合式 (9) ~ (11), 给出各向异性数字滤波器的定义如下

$$u^{t+1}(x) = \frac{\int_{y \sim x} w_s(x - y) w_g(u^t(x) - u^t(y)) w_{lc}(lc^t(x) - lc^t(y)) u^t(x) dy}{\int_{y \sim x} w_s(x - y) w_g(u^t(x) - u^t(y)) w_{lc}(lc^t(x) - lc^t(y)) dy} \quad (15)$$

可见, 式 (15) 同时考虑图像像素点的亮度属性、结构属性以及局部对比度, 是一种基于结构相似度的数字滤波器. 特别地, 当窗口函数 w_s 为各向同性高斯函数并且不考虑局部对比度的相似度量时, 式 (15) 退化为双边滤波器.

图 2 分别给出基于双边滤波器和各向异性滤波器的噪声图像去噪结果, 迭代次数均取 10, 邻域阶数均取 3. 图 2(a) 为高斯白噪声退化的“woman”图像, 噪声方差为 10. 图 2(b) 为双边滤波器的滤波结果. 双边滤波器能



图2

够较好地抑制平坦区域的噪声,同时能够保持强边缘结构.然而,过分平滑弱边缘等小尺度结构,导致数字图像的分片常数性;另外,人脸及胳膊区域存在明显的阶梯效应.正是这种分片常数性和阶梯效应使得图像的自然度显著降低.图2(c)为各向异性滤波器的滤波结果.各向异性滤波器能够在保持强边缘、角型以及弱边缘结构的同时较好地抑制噪声,使得图像低对比度区域中的阶梯效应明显减少,图像的自然度也得到较好的保持.因此,本文的结构保持各向异性数字滤波器是对双边滤波器的一种有效发展.

4 各向异性图像先验模型及边缘增强超分辨率重建算法

4.1 各向异性图像先验模型的提出

假设式(15)迭代过程收敛,即满足 $\lim_{t \rightarrow \infty} u^t(x) = u(x)$, $\forall x$, 从而下式成立

$$u(x) = \frac{\sum_{y \sim x} w_s(x-y) w_{lc}(lc(x)-lc(y)) w_g(u(x)-u(y)) u(y)}{\sum_{y \sim x} w_s(x-y) w_{lc}(lc(x)-lc(y)) w_g(u(x)-u(y))} \quad (16)$$

将式(16)展开,得

$$\sum_{y \sim x} w_s(x-y) w_{lc}(lc(x)-lc(y)) w_g(u(x)-u(y)) (u(x)-u(y)) = 0 \quad (17)$$

令 $\phi(x)$ 取为式(8),则式(17)可以近似看作下列最小能量泛函的极值表达

$$\hat{u} = \arg \min_u \left\{ \sum_{x, y \sim x} w_s(x-y) w_{lc}(lc(x)-lc(y)) \phi(u(x)-u(y)) \right\} \quad (18)$$

鉴于各向异性数字滤波器式(15)在图像去噪中优良的结构保持性,本文提出如下各向异性图像先验模型

$$\Pr(u) = \frac{1}{Z} \exp \left\{ -\frac{1}{T} \cdot H(u) \right\} \quad (19)$$

其中, $H(u)$ 定义为

$$H(u) = \sum_{x, y \sim x} w_s(x-y) w_{lc}(lc(x)-lc(y)) (u(x)-u(y))^2 \quad (20)$$

考虑最小能量泛函式(18)的求解.根据半二次正则

化理论^[2],当 $\phi(x)$ 取为式(8)时,式(18)的求解问题转化为如下等价的最小能量泛函

$$\hat{u} = \arg \min_u \left\{ \sum_{x, y \sim x} w_s(x-y) w_{lc}(lc(x)-lc(y)) \left(\phi^*(b_{x,y}) + b_{x,y} (u(x)-u(y))^2 \right) \right\} \quad (21)$$

其中,函数 ϕ^* 是关于 $b_{x,y}$ 的严格单调递减凸函数,并且 $b_{x,y} = (u_y - u_x) / (2 \cdot (u_y - u_x))$. 根据最速下降法以及 $w_g(x) = 1/x$,式(21)的迭代求解格式如下

$$u^{t+1}(x) = u^t(x) + \sum_{y \sim x} w_s(x-y) w_{lc}(lc^t(x)-lc^t(y)) \cdot w_g(u^t(x)-u^t(y)) (u^t(x)-u^t(y)) \quad (22)$$

其中, α 为迭代步长.

特别地,当 $y \sim x$ 为像素点 x 的最邻近4点邻域,同时不考虑局部对比度的相似度量时,式(22)退化为

$$u^{t+1}(x) = u^t(x) + \sum_{y \sim x} w_g(u^t(x)-u^t(y)) (u^t(x)-u^t(y)) \quad (23)$$

事实上,式(23)是下述形式非线性PDE的数值求解格式

$$\frac{\partial u}{\partial t} = \nabla \cdot \left(w_g(|\nabla u|) \cdot \nabla u \right) \quad (24)$$

该PDE最初由Perona等人^[23]在1990年针对各向同性的热扩散方程提出,以实现边缘保持的图像去噪.然而,众所周知的是,PDE在低对比度区域容易产生阶梯效应,导致数字图像自然度的降低;同时,没有考虑低对比度区域中的结构保持性,如尺度较小的纹理,导致数字图像的分片常数性.非线性PDE产生阶梯效应一个重要的原因在于,式(24)本质上是一个扩散-增强型PDE,会在梯度相对较大的像素点处起到冲击滤波的效果,尤其对于边缘结构.对于双边滤波器而言,每个像素点的邻域阶数 $s=3$,使得上述阶梯效应和分片常数性更为明显.当每个像素点的邻域阶数 $s=2$,不考虑几何距离度和对比度相似性度量,同时灰度相似性度量取为稳健函数时,式(21)退化为经典MRF模型^[3,4,16,19].当每个像素点的邻域阶数 $s=3$,窗口函数 w_s 取为各向同性的,灰度相似性度量 w_g 取为 l^1 范数,同时不考虑局部对比度的相似度量时,式(21)退化为Farsiu等^[10]提出的双边全变差模型.该模型秉承双边滤波器,同样存在上述不足.对于本文的各向异性图像先验模型,虽然在一定程度上继承了非线性PDE式(24)的边缘增强性,然而由于该模型融合了图像局部对比度的相似性度量,所以能够在保持图像重要几何结构的同时,明显减少低对比度区域上阶梯效应的产生.

4.2 基于各向异性模型的边缘增强SR重建

将各向异性图像先验模型式(19)代入最小能量泛函式(6),得

PSNR 值比较结果;图 4(b) 给出噪声方差为 3、不同帧数低分辨率图像情形下不同算法的 SR 重建图像的 PSNR 值比较结果. 实验结果均显示本文算法的有效性. 本组实验中, 各向异性建模方法参数取值为: $\alpha = 2$, $\beta = 1.5$, $\gamma = 0.25$, $s = 3$, $g = 0.25$, $l_c = 0.5$, $c_m = 0.125$, $\delta = 0.3$, $T = 15$; 此外, 初始图像 $u^0(x)$ 取为参考帧的双线性插值图像.

第二组实验利用 4 帧真实低分辨率图像 (128×128)

进行 SR 重建(上采样因子为 2), 结果如图 5. 迭代次数取 10, 其它参数同上述实验. 前两行中从左到右从上到下排列依次为: 低分辨率参考帧的像素复制图像以及基于双三次插值、经典 MRF 建模、各向异性建模的超分辨率重建图像; 第三行从左到右依次为: 前两行中四幅图像的局部放大部分(2 倍). 根据局部放大图像的视觉效果, 各向异性建模方法在保持边缘、抑制模糊、抑制阶梯效应等方面都明显优于双三次插值方法和经典 MRF 建模方法.

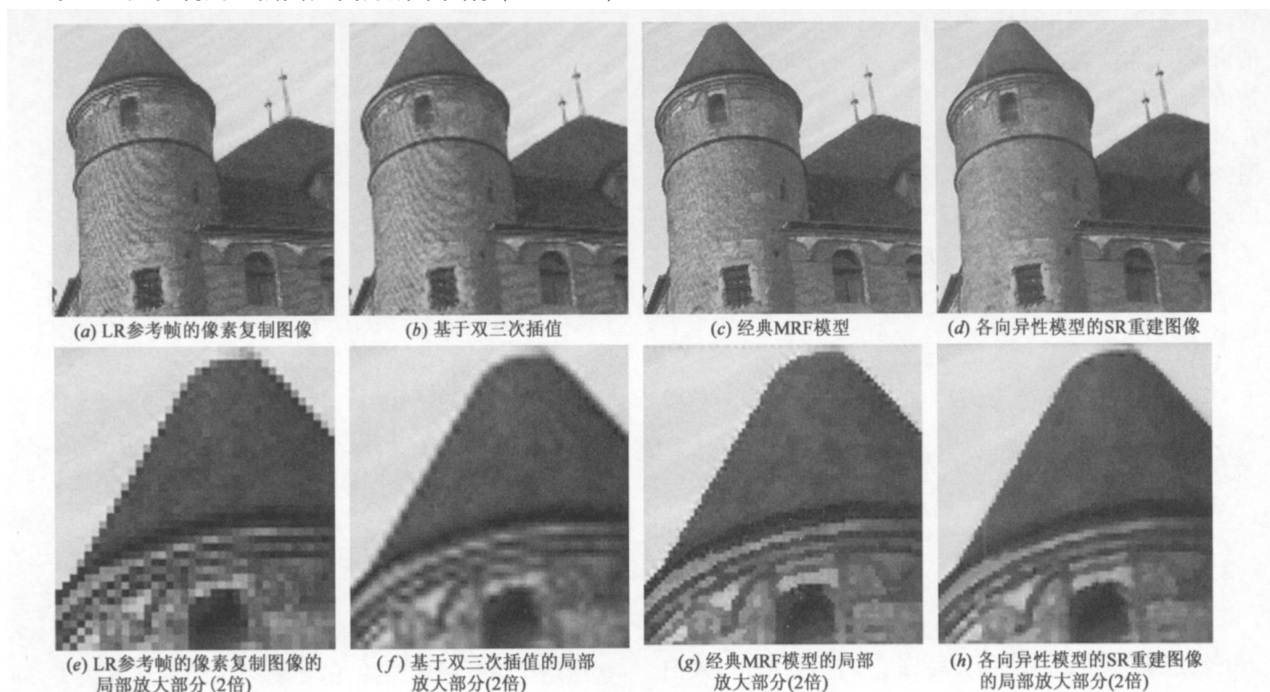


图5

6 结论

本文基于近期报道的双边滤波器, 研究设计出一种结构自适应的各向异性数字滤波器, 同时导出用于超分辨率重建的广义各向异性 MRF 图像先验模型. 基于各向异性模型, 提出联合估计亚像素运动和高分辨率图像的边缘增强超分辨率重建算法, 利用半二次正则化理论和最速下降法求解相应的最小能量泛函. 仿真的低分辨率图像序列和真实的低分辨率图像序列两种情形, 均验证了本文的超分辨率重建算法具有更强的噪声抑制性和边缘保持能力.

致谢 感谢各位评审专家给予我们工作的有益建议和帮助! 感谢肖亮博士给予本文工作的支持和帮助!

参考文献:

- [1] BORMAN S. Topics in Multiframe Superresolution Restoration [D]. Notre Dame, Indiana: University of Notre Dame, 2004.
- [2] CHARBONNIER P, LAURE B F, et al. Deterministic edge-preserving regularization in computed imaging[J]. IEEE Trans Image Processing, 1997, 6(2): 298 - 341.
- [3] SCHULTZ R R, STEVENSON R L. Extraction of high resolu-

tion frames from video sequences [J]. IEEE Trans on Image Processing, 1996, 5(6): 996 - 1011.

- [4] HARDIE R C, BARNARD K J, et al. Joint MAP registration and high resolution image estimation using a sequence of undersampled images [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 1997, 6(12): 1621 - 1633.
- [5] ELAD M, FEUER A. Restoration of a single super-resolution image from several blurred, noisy and undersampled measured images [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 1997, 6(12): 1646 - 1658.
- [6] NGUYEN N X. Numerical Algorithms for Image Superresolution [D]. California: Stanford University, 2000.
- [7] BOSE N K, et al. Super-resolution with second generation wavelets [J]. Signal Processing: Image Communication, 2004, 19: 387 - 391.
- [8] KIM H, HONG K S. Variational approaches to super-resolution with contrast enhancement and anisotropic diffusion [J]. Journal of Electronic Imaging, 2003, 12(2): 244 - 251.
- [9] CAPEL D, ZISSERMAN A. Super-resolution enhancement of text image sequences [A]. Proceedings of 15th International

- Conference on Pattern Recognition[C]. Washington DC:IEEE Computer Society,2000. 600 - 605.
- [10] FARSIU S, et al. Fast and robust multiframe super resolution [J]. IEEE Trans on Image Processing, 2004, 13(10): 1327 - 1344.
- [11] NG M K, BOSE N K. Mathematical analysis of superresolution methodology [J]. IEEE Signal Processing Magazine, 2003, 20(3): 62 - 74.
- [12] SIGIL C A, MOLINA R, et al. High-resolution images from low-resolution compressed video [J]. IEEE Signal Processing Magazine, 2003, 20(3): 37 - 48.
- [13] RAJAN D, CHAUDHURI S, et al. Multi-objective super resolution: concepts and examples [J]. IEEE Signal Processing Magazine, 2003, 20(3): 49 - 61.
- [14] PARK S C, PARK M K, et al. Super-resolution image reconstruction - a technical overview [J]. IEEE Signal Processing Magazine, 2003, 20(3): 21 - 36.
- [15] 韩玉兵, 陈小蕾, 吴乐南. 一种视频序列的超分辨率重建算法[J]. 电子学报, 2005, 33(01): 126 - 130.
Han Yu-bing, Chen Xiao-qiang, et al. A super-resolution reconstruction algorithm for video sequences [J]. Acta Electronica Sinica, 2005, 33(01): 126 - 130. (in Chinese)
- [16] 韩玉兵, 吴乐南. 基于自适应滤波的视频序列超分辨率重建[J]. 计算机学报, 2006, 29(04): 642 - 647.
Han Yu-bing, Wu Le-nan. Video sequence super-resolution based on adaptive filtering [J]. Journal of Computer, 2006, 29(04): 642 - 647. (in Chinese)
- [17] 孟庆武. 预估计混叠度的 MAP 超分辨率处理算法[J]. 软件学报, 2004, 15(02): 207 - 214.
Meng Qing-wu. MAP super-resolution algorithm via [J]. Journal of Software, 2004, 15(02): 207 - 214. (in Chinese)
- [18] IRANI M, PELEG S. Improving resolution by image registration [J]. CVGIP: Graphical Models and Image Proc, 1991, 53(5): 231 - 239.
- [19] SCHULTZ R R, et al. A Bayesian approach to image expansion for improved definition [J]. IEEE Trans on Image Processing, 1994, 3(3): 233 - 242.
- [20] TOMASI C, MANDUCHI R. Bilateral filtering for gray and color images [A]. Proceedings of the Sixth International Conference on Computer Vision [C]. Washington DC: IEEE Computer Society, 1998. 839 - 846.
- [21] BARASH D. Bilateral filtering and anisotropic diffusion: towards a unified viewpoint [A]. Proceedings of the Third International Conference on Scale-Space and Morphology in Computer Vision [C]. London: Springer-Verlag, 2001. 273 - 280.
- [22] ELAD M. On the bilateral filter and ways to improve it [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2002, 11(10): 1141 - 1151.
- [23] PERONA P, et al. Scale-space and edge detection using anisotropic diffusion [J]. IEEE Trans. on PAMI, 1990, 12(7): 629 - 639.
- [24] 邵文泽, 韦志辉. 一种非线性数字滤波器的统一设计框架及其性能分析 [J]. 计算机学报, 2007, 30(01): 91 - 102.
Shao Wen-ze, Wei Zhi-hui. Design of a nonlinear digital filter and its behavior analysis [J]. Journal of Computer, 2007, 30(01): 91 - 102. (in Chinese)
- [25] PARIS S, DURAND F. A fast approximation of the bilateral filtering using a signal processing approach [J]. International Journal of Computer Vision, 2009, 81(1): 24 - 52.
- [26] DURAND F, DORSEY J. Fast bilateral filtering for the display of high dynamic-range images [A]. Proceedings of the 29th Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques [C]. New York: ACM, 2002. 257 - 266.
- [27] BIGUN J, GRANLUND G H, et al. Multidimensional orientation estimation with applications to texture analysis and optical flow [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1991, 13(8): 775 - 790.
- [28] Weickert J. Scale-space properties of nonlinear diffusion filtering with a diffusion tensor [R]. Kaiserslautern: University of Kaiserslautern, 1994.
- [29] FENG X G. Analysis and approaches to image local orientation estimation [D]. California: University of California Santa Cruz, 2003.
- [30] SHAO W Z, WEI Z H. Local geometry driven image magnification and applications to super-resolution [J]. Lecture Notes in Computer Science, 2006, 4222(2): 742 - 751.
- [31] 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(06): 1075 - 1081.
Zhang Xin-ming, Shen Lan-sun. Multiscale super-resolution [J]. Journal of Software, 2003, 14(06): 1075 - 1081. (in Chinese)

作者简介:



邵文泽 男, 1981年10月出生于江苏省连云港市. 2003年毕业于南京理工大学信息与计算科学系. 现为南京理工大学计算机科学与技术学院博士研究生, 从事图像建模、图像插值、超分辨率重建、数学反问题方面的研究工作.
Email: shaowenze1010@yahoo.com.cn



韦志辉 男, 1963年11月出生于江苏省淮安市. 现为南京理工大学计算机科学与技术学院教授、博士生导师, 从事图像建模、多尺度变换、稀疏表示、数字水印、编码与压缩等方面的研究工作. 在国内外发表学术论文 80 余篇.
Email: gswwei@mail.njust.edu.cn