

doi: 10.3788/gzxb20124105.0554

基于梯度阈值自适应处理的红外图像超分辨率重建

白俊奇¹, 郑坚¹, 赵春光¹, 王娴雅²

(1 中国电子科技集团第二十八研究所, 南京 210007)

(2 南京理工大学 近程高速目标探测技术国防重点学科实验室, 南京 210094)

摘 要:超分辨率图像重建中, Huber 马尔可夫随机场模型是一种常用的正则化算子. 针对 Huber 函数中固定梯度阈值引起图像重建效果不佳的问题, 本文提出一种梯度阈值自适应处理的红外图像超分辨率重建算法. 在最大后验概率理论框架下, 构造了基于数据项和正则项的正则化模型; 通过迭代的方式, 利用中间重建结果不断更新正则化参量, 解决了 Huber 马尔可夫随机场模型中梯度阈值不易选择的难题. 实验结果表明, 改进算法能够根据局部梯度特征自适应选择相应的正则化参量并找到最优解, 较好恢复目标细节的同时有效抑制了图像噪音.

关键词:红外图像; 超分辨率重建; 马尔可夫随机场; 梯度阈值; 自适应

中图分类号: TN911.73

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2012)05-0554-4

0 引言

高分辨率成像是图像处理环节进行有效信息提取和分析的重要前提. 然而, 实际成像系统获取的图像空间分辨率往往不能满足信息处理的需求, 这种现象在红外成像领域更为普遍^[1].

目前, 国内外报道了大量超分辨率重建领域的研究工作, 主要方法包括迭代反向投影法、极大似然估计器、最大后验概率法 (Maximum A Posteriori Probability, MAP) 以及自适应滤波法等. Irani 等对迭代反向投影算法进行了研究, 根据低分辨率图像与实际图像的模拟误差不断更新当前估计值, 以得到估计出的高分辨图像^[2]; Kim 等将边缘增强和各向异性扩散有效结合, 提出一种改进的变分超分辨率重建算法^[3]; Capel 等提出基于连续全变差模型的文本图像超分辨率重建算法^[4]; Farsiu 等提出基于双边全变差模型的快速鲁棒 SR 重建算法^[5]; Pham 等提出一种鲁棒超分辨率重建算法, 通过最小化加权高斯误差范数进行图像超分辨率重建^[6]; Hardie 等采用最大后验概率估计处理红外图像的非均匀性和进行超分辨率重建^[7].

超分辨率重建中, Huber 马尔可夫随机场模型 (Huber Markov Random Field, HMRF)^[8-10] 是一种常用正则化算子, 然而, 模型中的固定阈值选择不恰当往往导致重建后图像的高频信息损失严重. 针对该问题, 本文提出一种梯度阈值自适应处理的红

外图像超分辨率重建算法. 算法在最大后验概率理论框架下, 构造了基于数据项和正则项的自适应正则化模型, 解决了 HMRF 正则化梯度阈值不易选择的难题.

1 MAP 理论模型

高分辨率图像 X 、低分辨率图像序列 $\{Y_k | k = 1, 2, \dots, N\}$ 、随机噪音 $\{E_k | k = 1, 2, \dots, N\}$ 和降质因子 H 间的关系模型可表示为

$$Y_k = HX + E_k \quad (1)$$

X 的 MAP 估计等价于使后验概率密度函数 $P(X | Y_1, Y_2, \dots, Y_N)$ 的值最大, 即^[11]

$$X = \operatorname{argmax} P(X | Y_1, Y_2, \dots, Y_N) \quad (2)$$

由 Bayes 条件概率论得

$$X = \operatorname{argmax} \frac{P(Y_1, Y_2, \dots, Y_N | X) P(X)}{P(Y_1, Y_2, \dots, Y_N)} \quad (3)$$

将 MAP 方程的最大化问题转化为最小化问题, 即

$$X = \operatorname{argmin} \{-\log[P(Y_1, Y_2, \dots, Y_N | X)] - \log[P(X)]\} \quad (4)$$

式中, $\log P(Y_1, Y_2, \dots, Y_N | X)$ 是最大似然函数的对数, $\log P(X)$ 是 X 先验概率的对数.

2 HMRF 正则化模型

HMRF 正则化模型是一种常用的正则化算子, 指数核的定义为

基金项目: 国家自然科学基金 (No. 61101199) 和江苏省自然科学基金 (No. BK2011699) 资助

第一作者: 白俊奇 (1982-), 男, 工程师, 博士, 主要研究红外图像处理. Email: baijunqi168@yahoo.cn

收稿日期: 2011-12-09; **修回日期:** 2012-02-08

$$\Omega(X_k, T) = \sum_{x,y,r=1}^4 \rho(d_{x,y,r}^k(X_k), T) \quad (5)$$

$\rho(d_{x,y,r}^k(X_k), T)$ 表示边缘惩罚函数, T 是阈值(需设定初始值), $d^k(X_k)$ 描述了图像局部空间平滑度, 表达式如式(6)~(9).

$$d_{x,y,1}^k(X_k) = X_k(x-1, y) - 2X_k(x, y) + X_k(x+1, y) \quad (6)$$

$$d_{x,y,2}^k(X_k) = X_k(x, y-1) - 2X_k(x, y) + X_k(x, y+1) \quad (7)$$

$$d_{x,y,3}^k(X_k) = X_k(x-1, y-1)/2 - X_k(x, y) + X_k(x+1, y+1)/2 \quad (8)$$

$$d_{x,y,4}^k(X_k) = X_k(x+1, y-1)/2 - X_k(x, y) + X_k(x-1, y+1)/2 \quad (9)$$

式中, $d_{x,y,1}^k(X_k)$ 、 $d_{x,y,2}^k(X_k)$ 、 $d_{x,y,3}^k(X_k)$ 和 $d_{x,y,4}^k(X_k)$ 分别表示 $X_k(x, y)$ 在垂直、水平、对角线以及反对角线方向的二阶差分。

3 梯度阈值自适应处理的超分辨率重建

假设第 k 帧低分辨率图像 $\{Y_k | k=1, 2, \dots, N\}$ 受均值为 0, 方差为 σ_k 的高斯噪声影响且独立同分布, 式(4)中条件概率函数 $P(Y_1, Y_2, \dots, Y_N | X)$ 可表达为

$$P(Y_1, Y_2, \dots, Y_N | X) \propto \prod_{k=1}^N \exp \left\{ -\frac{\| (Y_k - H_k X) \|^2}{2\sigma_k} \right\} \quad (10)$$

根据 Markov 随机场模型, 先验概率 $P(X)$ 表达为

$$P(X) \propto \exp \{ -\lambda \| Q(X) \|^2 \} \quad (11)$$

式中, $Q(X)$ 表正则化算子示, 因此, 式(4)可表示为

$$X = \operatorname{argmin} \left\{ \sum_{k=1}^N \frac{\| (Y_k - H_k X) \|^2}{2\sigma_k} + \lambda \| Q(X) \|^2 \right\} \quad (12)$$

$$d(X) = \sum_{k=1}^N \frac{\| (Y_k - H_k X) \|^2}{2\sigma_k} \quad (13)$$

$$r(X) = \| Q(X) \|^2 \quad (14)$$

式中, $d(X)$ 表示数据项, $r(X)$ 表示正则项, λ 是调节参量。

HMRP 正则化模型中, 边缘惩罚函数 $\rho(z, T)$ 表示为

$$\rho(z, T) = \begin{cases} z^2 & |z| \leq T \\ 2T|z| - T^2 & |z| > T \end{cases} \quad (15)$$

式中, T 是梯度阈值. 若 $|z| \leq T$ 时, $\rho(z, T)$ 表示非线性惩罚函数, 若 $|z| > T$ 时, $\rho(z, T)$ 表示线性惩罚函数。

因此, T 直接影响边缘惩罚的尺度. 当 T 变小时, 重建图像的细节显现, 同时噪音抑制能力下降; 当 T 变大时, 重建图像趋向平滑. 本文基于数据项和正则项, 提出一种自适应正则化模型, 梯度阈值

T_k 的表达式为

$$T_k = \frac{d(X_k) + p}{r(X_k) + q} \cdot T_0 \quad (16)$$

式中, T_0 是初始梯度阈值, p 和 q 是常量, 分别表示数据项和正则项调节系数, $r(X_k) + q \neq 0$.

式(16)反映: 数据项变小时, 拟合误差减小, 重建图像应保留更多的边缘细节, 此时, 算法自适应减小阈值 T_k ; 正则项变大时, 图像高频信息丢失严重, 为了保证重建图像不偏离观测的图像, 此时, 算法自适应减小阈值 T_k .

自适应 MAP 超分辨率重建通过最小化式(17)的代价函数得到 X_k

$$f(X_k, T_k, \lambda) = \min \left\{ \sum_{k=1}^N \| Y_k - H_k X_k \|^2 + \lambda \sum_{x,y,r=1}^4 \rho(d_{x,y,r}^k(X_k, T_k)) \right\} \quad (17)$$

式中, $\sum_{k=1}^N \| Y_k - H_k X_k \|^2$ 表示先验概率函数的运算核, $\sum_{x,y,r=1}^4 \rho(d_{x,y,r}^k(X_k, T_k))$ 表示先验模型的运算核。

4 超分辨率重建步骤

用梯度投影法^[11]对 X_k 进行迭代估计, 具体步骤为:

1) 给定初始条件

$$X_k^{(0)} = L_1 L_2 \cdot H_k^T Y_k \quad (18)$$

式中, $X_k^{(0)}$ 是初始高分辨率图像, H_k^T 是 H_k 的逆运算, Y_k 是低分辨率图像序列, L_1 和 L_2 分别是 x 和 y 方向的放大倍数。

2) 计算目标梯度函数 Grad_k^i

$$\operatorname{Grad}_k^i = \nabla f(X_k^{(i)}, T_k, \lambda) \quad (19)$$

3) 映射 Grad_k^i 到约束空间

$$p_k^{(i)} = -P \cdot \operatorname{Grad}_k^i \quad (20)$$

4) 通过目标函数 $f_k^{(i)}$ 的二阶泰勒展开式, 计算步长 τ_i

$$\tau_i = -\frac{\operatorname{Grad}_k^i p_k^{(i)}}{p_k^{(i)T} \nabla^2 f(X_k^{(i)}, T_k, \lambda) p_k^{(i)}} \quad (21)$$

式中, $\nabla^2 f(X_k^{(i)}, T_k, \lambda)$ 是 Hessian 矩阵。

5) $X_k^{(i)}$ 以步长 τ_i 沿 $p_k^{(i)}$ 方向迭代, 得更新方程

$$X_k^{(i+1)} = X_k^{(i)} + \tau_i p_k^{(i)} \quad (22)$$

6) 给定阈值 ϵ , 若满足

$$E_r = \frac{\| X_k^{(i+1)} - X_k^{(i)} \|}{\| X_k^{(i)} \|} \leq \epsilon \quad (23)$$

停止迭代, 否则, 从步骤 2) 重新运算。

5 实验结果

5.1 图像仿真

实验图像序列源于非制冷红外成像系统, 降质

过程未知,模糊核假设为高斯点扩展函数(Point Spread Function,PSF),其标准差采用IBD方法估计为 $\sigma=0.36$,空间上采样因子是2,正则化参量 $\lambda=0.004$,停止参量 $\epsilon=0.0002$.图1~3分别是低分辨率图像,对低分辨率图像使用HMRF正则化重建和自适应HMRF正则化重建的图像效果.



图1 低分辨率图像
Fig.1 Low-resolution image

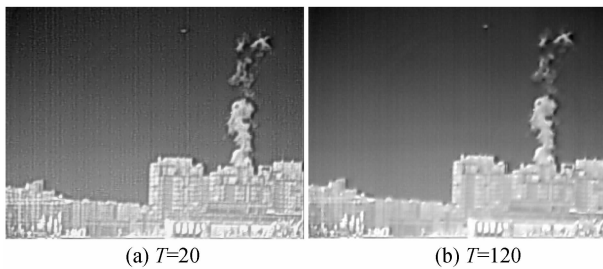


图2 HMRF正则化重建
Fig.2 HMRF construction



图3 自适应HMRF正则化重建
Fig.3 Adaptive HMRF construction

分析图1~3:低分辨率图像层次单一,细节模糊,弱小目标看不清楚(圆圈所示);图2(a)中梯度阈值 $T=20$,高频信号惩罚程度减小,图像细节恢复好,因噪音被过度放大,视觉效果差;图2(b)中梯度阈值 $T=120$,由于 T 取值偏大,过度惩罚了高频信号,图像细节损失严重;图3中梯度阈值根据数据项和正则项自适应调整,较好恢复细节信息的同时有效抑制了噪音,弱小目标清晰可辨.

5.2 数据分析

为定量分析各种HMRF算法的性能^[10],采用峰值信噪比(Peak Signal Noise Ratio,PSNR)、辐射分辨率(Radiation Resolution,RR)和品质因数 Q 对图像进行衡量,计算结果如表1.

表1 不同超分辨率重建图像的PSNR和RR计算结果

	HMRF algorithms		
	Fig. 2	Fig. 3	Fig. 4
PSNR	55.347	59.926	60.475
RR	0.701	0.695	0.707
Q	0.938	0.962	0.975

表1中,PSNR和 Q 从大到小分别是:自适应HMRF正则化重建、HMRF正则化重建($T=120$)、HMRF正则化重建($T=20$).RR从大到小分别是:自适应HMRF正则化重建、HMRF正则化重建($T=20$)、HMRF正则化重建($T=120$).PSNR和 Q 反映:自适应HMRF正则化重建算法能有效提高图像的信噪比,图像质量更优.RR反映:自适应HMRF正则化重建算法的细节信息恢复能力最强.算法的收敛性:根据式(23),设定停止参量 $\epsilon=0.0002$,若满足停止条件,自适应HMRF正则化重建迭代8次,HMRF正则化重建(梯度阈值 $T=20$)迭代15次,HMRF正则化重建(梯度阈值 $T=120$)迭代11次.由于改进算法采用梯度投影法求解MAP估计表示的约束最优化问题,存在海塞矩阵和高维向量的乘积,运算量较大.减小MAP估计运算量将是下一阶段研究的重点.

6 结论

针对超分辨率重建过程的病态解问题,本文提出一种梯度阈值自适应处理的红外图像超分辨率重建算法.算法解决了HMRF正则化中梯度阈值不易选择的难题.实验结果表明,改进的算法在较好恢复目标细节的同时有效抑制了图像噪音,改善了红外成像系统的性能.

参考文献

- [1] SONG Rui, WU Cheng-ke, FENG Ying, *et al.* A new MAP based texture adaptive super-resolution image reconstruction algorithm[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2009, **37**(5): 1124-1129.
宋锐,吴成柯,封颖,等.一种新的基于MAP的纹理自适应超分辨率图像复原算法[J]. *电子学报*, 2009, **37**(5): 1124-1129.
- [2] IRANI M, PELEG S. Improving resolution by image registration[J]. *CVGIP: Graphical Models and Image Processing*, 1991, **53**(3): 231-239.
- [3] 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.
- [4] CAPEL D, ZISSERMAN A. Super-resolution enhancement of text image sequences[C]. Proceedings of 15th International Conference on Pattern Recognition, Washington DC: IEEE Computer Society, 2000, 600-605.
- [5] FARSIU S, ROBINSON M D, ELAD M, *et al.* Fast and robust multiframe super resolution[J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2004, **13**(10): 1327-1344.
- [6] PHAM T Q, Van VLIET L J, SCHUTTE K. Robust super-

- resolution by minimizing a Gaussian-weighted ERROR NOrm [C]. 4th AIP International Conference and the 1st Congress of the IPIA, Journal of Physics: Conference Series 124 (2008) 012037, pp1-20.
- [7] HARDIE R C, DROEGE D R. A map estimator for simultaneous superresolution and detector nonuniformity correction [J]. *EURASIP Journal on Advances in Signal Processing*, 2007, ID89354, pp1-11.
- [8] LOU Shuai, DING Zhen-liang, YUAN Feng, *et al.* Spatial adaptive regularized MAP super-resolution reconstruction algorithm [J]. *Computer Applications and Software*, 2009, 26(12): 238-240.
娄帅, 丁振良, 袁峰, 等. 一种空间自适应正则化 MAP 超分辨率重建算法 [J]. *计算机应用与软件*, 2009, 26(12): 238-240.
- [9] XIAO Chuang-bai, YU Jing, XUE Yi. A novel fast algorithm for MAP super-resolution image reconstruction [J]. *Journal of Computer Research and Development*, 2009, 46(5): 872-880.
肖创柏, 禹晶, 薛毅. 一种基于 MAP 的超分辨率图像重建的快速算法 [J]. *计算机研究与发展*, 2009, 46(5): 872-880.
- [10] WANG Su-yu, SHEN Lan-sun, ZHUO Li, *et al.* A weight matrix based blind super resolution restoration algorithm [J]. *Acta Electronica Sinica*, 2009, 37(6): 1198-1202.
王素玉, 沈兰荪, 卓力, 等. 一种基于权值矩阵的序列图像超分辨率盲复原算法 [J]. *电子学报*, 2009, 37(6): 1198-1202.
- [11] SCHULTZ R R, STEVENSON R L. Extraction of high-resolution frames from video sequences [J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 1996, 5(6): 996-1011.

Super-resolution Reconstruction of Infrared Image Based on Self-adaptive Gradient Threshold

BAI Jun-qi¹, ZHENG Jian¹, ZHAO Chun-guang¹, WANG Xian-ya²

(1 The 28th Research Institute of China Electronics Technology Group Corporation, Nanjing 210007, China)

(2 Ministerial Key Laboratory of JGMT, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

Abstract: In the super-resolution image reconstruction, the model of Huber-markov random field is a common regularizing operator. Aiming at the unsatisfying effect of image reconstruction caused by fixed gradient threshold in the Huber function, a super-resolution reconstruction algorithm is proposed based on self-adaptive gradient threshold. The regularizing model is structured based on data item and regular item under the maximum a posteriori probability framework; the regularizing parameters are updated using the intermediate results via iterative method and can solve the selected problem of gradient threshold in the model of Huber-markov random field. Experimental results show, the improved algorithm can select the proper regularizing parameters based on local gratitude threshold and find the optimal result, recover detailed information and eliminate noise effectively.

Key words: Infrared image; Super-resolution reconstruction; Markov random field; Gradient threshold; Self-adaptive