

压缩图像空时自适应正则化超分辨率重建

徐忠强 朱秀昌

(南京邮电大学“图像处理与图像通信”信息产业部和江苏省重点实验室,南京 210003)

摘要 所谓超分辨率(SR)技术就是由低分辨率(LR)图像序列来重建高分辨率(HR)图像的技术,而基于压缩图像的SR技术正成为当前研究的热点。为了提高压缩图像的重建质量,在正则化理论的基础上,通过利用比特流中的信息,提出了一种新颖的空时自适应超分辨率重建算法,该算法先利用正则化代价函数控制时域数据和空域先验信息之间的平衡,使正则化参数在SR重建过程中得到自适应地调整,然后利用迭代梯度下降法进行超分辨率重建。仿真实验表明,该自适应算法比采用传统算法重建的图像的主、客观质量有一定的提高,适合压缩图像的应用。

关键词 正则化 自适应 超分辨率重建 压缩图像

中图法分类号:TN919.81 TP391.41 文献标识码:A 文章编号:1006-8961(2008)11-2087-06

Compressed Image Regularized Spatio-temporally Adaptive Super-resolution Reconstruction

XU Zhong-qiang, ZHU Xiu-chang¹⁾

(Information Industry Ministry and Jiangsu Province Key Laboratory of Image Processing & Image Communication, Nanjing University of Posts & Telecommunications, Nanjing 210003)

Abstract Super-resolution (SR) technique is the task of estimating High-resolution (HR) images from a sequence of Low-resolution (LR) observations, which has been a great focus for compressed images. Based on the theory of regularization, a novel spatio-temporally adaptive SR algorithm is developed and analyzed using the information from the compressed bitstream. A new form of regularized cost function to control the balance between temporal data and spatial prior information is proposed. An iterative gradient descent algorithm is utilized to reconstruct the HR image. The regularization parameter is simultaneously estimated at each iteration step in the reconstruction process of the HR image. Experimental results demonstrate that the proposed algorithm has an improvement in terms of both objective and subjective quality, and it is applicable for compressed images.

Keywords regularization, adaptive, super-resolution reconstruction, compressed image

1 引言

超分辨率(super-resolution, SR)算法是利用多幅低分辨率(low-resolution, LR)图像间的非冗余信息来提高图像的分辨率,它也是一个病态求反问题。在以往的研究工作中,正则化方法不仅

被广泛应用在病态问题的反向求解中^[1],而且正则化参数自动更新的迭代自适应算法^[2,3]也先后被提出。而在当前的图像系统中,由于图像在传输和存储前都要进行压缩,因而导致多种编码效应,尤其在低码率的应用中。为消除这些效应,多种后处理和恢复算法^[4-6]也相继被提出。由于这些算法不能有效利用图像间的相关信息(如

基金项目:江苏省自然科学基金项目(BK 2004151)

收稿日期:2006-11-20;改回日期:2007-04-28

第一作者简介:徐忠强(1972~),男,江苏省广播电视总台高级工程师,南京邮电大学博士研究生。研究方向为图像处理与图像通信。

E-mail:jstvxzq@sohu.com

时域冗余),因此效果并不是很好。Choi 等人证实,充分利用图像间的相关性可大幅度提高重建图像的质量^[7]。这样一来,时间方向各帧代表相关的同一场景但却不完全相同的序列,无论是帧内还是帧间的信息都可被利用。正因如此,超分辨率算法必须考虑压缩系统的影响。Altunbasak 等人利用量化信息在压缩域进行重建^[8],但该方法把量化误差之外所有的误差源全部忽略掉,并且也没有考虑成像过程的降质问题;Gunturk 等人把成像过程的加性噪声和压缩过程的量化噪声统一联合起来^[9],其缺陷是没有利用运动估计进行运动补偿;Park 等人针对离散余弦变换(DCT)的图像压缩,提出了正则化参数与量化噪声在重建过程中同时解算的方法^[10],但其也未考虑运动补偿。

本文基于正则化理论,提出了一种新颖的正则化代价函数,它用来平衡时域数据和空间先验信息,而正则化操作则被用来获取图像序列的空时相关性,然后利用迭代梯度下降法来求解 HR (high-resolution) 图像,而正则化参数在迭代的过程中可同时得到。本文的算法侧重于同时进行运动估计和 SR 重建,由于其利用了空域和时域的信息自适应地进行重建,因而重建图像的主、客观质量均较高。

2 压缩图像降质模型

若用 f 表示 HR 图像,其大小为 $qM \times qN$, q 为分辨率增强因子,则 HR 图像序列的第 k 幅与第 l 幅图像间的关系可用矢量形式表示为^[11]

$$f_l = C(d_{l,k})f_k + n_k \quad (1)$$

式中, $d_{l,k}$ 表示第 l 幅与第 k 幅图像间偏移的列矢量; $C(d_{l,k})$ 是描述整幅偏移的 2 维运动矩阵; n_k 反映了像素位置的偏移误差,一般为加性噪声。

HR 图像经模糊和降采样等处理(用矩阵 W 表示)后得到离散的 LR 图像序列 g_l ,其大小为 $M \times N$ 。

HR 图像与 LR 图像之间的关系可表示为

$$g_l = Wf_l + n_l \quad (2)$$

式中, n_l 是采集噪声。把式(1)、式(2)联立起来可得

$$g_l = WC(d_{l,k})f_k + n_{l,k} \quad (3)$$

式中, $n_{l,k}$ 包含加性噪声和采集噪声。

LR 图像序列 g_l 经压缩后可得到 y_l ,它与 HR 图像之间的关系为^[12]

$$y_l = T^{-1}Q[T(WC(d_{l,k})f_k - y_l^{MC} + n_{l,k})] + y_l^{MC} \quad (4)$$

这里 T 是 DCT 变换, $Q[\cdot]$ 是量化操作, y_l^{MC} 是 y_l 的运动补偿项。HR 图像和 LR 图像间的关系如图 1 所示:

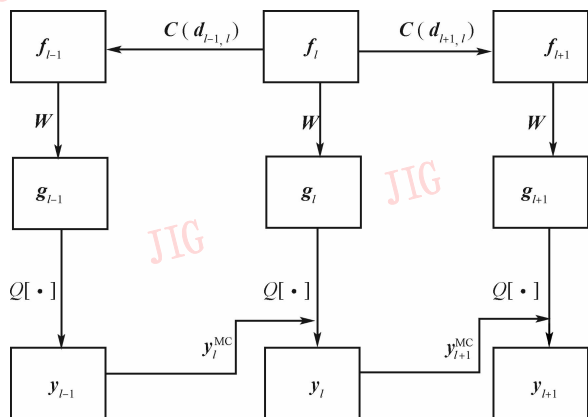


图 1 HR 图像和 LR 图像间的关系

Fig. 1 Relationships between the HR and LR images

式(4)中的量化操作会在解码图像中引入量化噪声,由于它是信号独立的,所以第 l 幅压缩的 LR 图像 y_l 可进一步简化为

$$y_l = WC(d_{l,k})f_k + q_l \quad l = 1, 2, \dots, L \quad (5)$$

式中, q_l 代表量化噪声。

既然每个 DCT 系数的量化值确定了相应系数精确值之间的间隔,因此在不知晓其他附加信息的情况下,不可能精确重建 HR 图像,亦即从压缩的 y_l 去重建 HR 图像 f_k 是一个典型的病态求反问题。

3 空时自适应重建算法

3.1 正则化代价函数

众所周知,正则化方法利用 HR 图像的先验信息可使病态反问题良态化。本文先利用正则化的方法来获取图像序列的空时相关性,然后通过最小化以下代价函数来求解 f_k :

$$J(f_k) = J_t(f_k) + \lambda(f_k)J_s(f_k) \quad (6)$$

式中, $J_t(f_k)$ 是时域(下角 t 代表 time)正则项, $J_s(f_k)$ 是空域(下角 S 代表 space)正则项, $\lambda(f_k)$ 是正则化参数。

根据压缩图像的降质模型,本文将时域正则项

定义为

$$J_1(f_k) = \sum_{l=k-T_B}^{k+T_F} (\|y_l - WC(d_{l,k})f_k\|^2 + \|f_l - C(d_{l,k})f_k\|^2) \quad (7)$$

其中, T_F 和 T_B 分别表示沿时间轴前后方向 SR 算法利用的图像数。空域正则项被定义为

$$J_S(f_k) = \|D_1 f_k\|^2 + \|D_2 W f_k\|^2 \quad (8)$$

式中, D_1 代表高通操作, D_2 代表沿估计帧 f_k 的块边缘的高通操作。

3.2 正则化参数的自适应估计

正则化参数在重建的过程中扮演着重要的角色,因为它可确保代价函数的凸性和解的稳定性。若参数过大,则边缘和细节被平滑,若参数过小,则失真较大。因此可在重建 HR 图像的每一迭代过程中对其进行估计。

为了使代价函数 $J(f_k)$ 具有全局最小, $\lambda(f_k)$ 的选择应该利于对时域正则冗余项 $J_1(f_k)$ 和空域平滑项 $J_S(f_k)$ 的平衡进行控制。本文对 $\lambda(f_k)$ 施加以下特性^[13]:

$$\lambda(f_k) = \gamma_k [J(f_k)] \quad (9)$$

式中, γ_k 是一系数,它控制着的 $J(f_k)$ 的凸度。本文根据文献[14]选择

$$\frac{1}{\gamma_k} = 2\|y_k\|^2 = 2\|y_l\|^2 \quad (10)$$

这样一来,即可得到:

$$\lambda(f_k) = \frac{J_1(f_k)}{2\|y_k\|^2 - J_S(f_k)} \quad (11)$$

恰当的 $\frac{1}{\gamma_k}$ 不仅可阻止病态问题中正则化参数增大的可能性,而且还可自适应地增强图像的细节。由此可见,空域平滑项 $J_S(f_k)$ 越小,能量越集中分布在重建的 HR 图像的低频部分,此时对应较小的 $\lambda(f_k)$,因此可用来进一步重建 HR 图像的高频部分。反之亦然。

3.3 运动估计

获取 HR 图像的重要一步是对运动矢量进行估计,但编码器提供的运动矢量不能直接利用,这是因为:(1)精度不够高;(2)它们只针对 LR 图像;(3)并不能提供所有的运动矢量,因此,必须对 HR 图像的运动矢量进行估计。

既然编码器为了压缩 LR 图像已提供了运动矢量,那么就可以利用此信息来估计 HR 图像的运动矢量。估计时可以考虑把已估计出的 HR 图像的运动

矢量和 LR 图像提供的运动矢量线性组合成以下一新的运动矢量集:

$$d_{l,k} = \alpha_{l,k} d_{l,k}^y + (1 - \alpha_{l,k}) d_{l,k}^f \quad (12)$$

其中, $d_{l,k}^y$ 是对编码器提供的 LR 图像运动矢量进行上采样后得到的运动矢量, $d_{l,k}^f$ 是由估计的 HR 图像得到的运动矢量, $0 \leq \alpha_{l,k} \leq 1$ 是控制参数。显然,如果 $\alpha_{l,k} = 0$, 则不能利用编码器提供的运动矢量,或表明 $d_{l,k}^y$ 不可靠,或编码器根本没提供运动矢量。

已有的实验^[15]虽然验证了这种方法提高了运动矢量估计的精确度,但在某些情况下却未必(例如,当宏块包含部分或两个不同的运动物体时)。为此,式(12)只能应用在 $d_{l,k}^y$ 和 $d_{l,k}^f$ 差值的模小于一个预定值 δ 的情况下,即

$$d_{l,k} = \begin{cases} \alpha_{l,k} d_{l,k}^y + (1 - \alpha_{l,k}) d_{l,k}^f & d \leq \delta \\ d_{l,k}^f & d > \delta \end{cases} \quad (13)$$

其中, $d = |d_{l,k}^y - d_{l,k}^f|$ 。

3.4 HR 图像重建

由于 $J(f_k)$ 的每一项都是二次项,并且是凸的,显然,在这样一个凸约束条件下的求解问题具有良态解。因此可利用迭代梯度下降优化算法来求解代价函数(见式(6))。

重建图像时,首先对 HR 图像进行初始估计得到 $f_k^{(0)}$, 然后利用以下准则进行不断迭代:

$$f_k^{(n+1)} = f_k^{(n)} - \beta \nabla J(f_k^{(n)}) \quad n = 0, 1, 2, \dots \quad (14)$$

式中, $\nabla J(f_k)$ 是代价函数针对 f_k 的梯度:

$$\nabla J(f_k) \approx 2 \sum_{l=k-T_B}^{k+T_F} \left\{ C^T(d_{l,k}) W^T [WC(d_{l,k})f_k - y_l] + C^T(d_{l,k}) [f_l - C(d_{l,k})f_k] \right\} + \lambda(f_k) (D_1^T D_1 + W^T D_2^T D_2 W) f_k + 2J_S(f_k) \nabla \lambda(f_k) \quad (15)$$

\tilde{f}_k 应满足 $\nabla J(\tilde{f}_k) = 0$, 也应满足 $\nabla \lambda(\tilde{f}_k) = 0$ 。这样,式(15)的最后一项为零。于是 HR 图像 f_k 可以利用以下迭代方法得到:

$$f_k^{(n+1)} = f_k^{(n)} - \beta \sum_{l=k-T_B}^{k+T_F} \left\{ C^T(d_{l,k}) W^T [WC(d_{l,k})f_k^{(n)} - y_l] + C^T(d_{l,k}) [f_l - C(d_{l,k})f_k^{(n)}] \right\} + \lambda(f_k^{(n)}) (D_1^T D_1 + W^T D_2^T D_2 W) f_k^{(n)} \quad (16)$$

式中, $\lambda(f_k^{(n)})$ 和 $f_k^{(n)}$ 分别代表第 n 次迭代后第 k 幅图像的正则化参数和重建的 HR 图像, β 是收敛参数。

在重建过程中,首先进行初始化,即先把解码的图像通过双线性插值内插到 HR 栅格上,作为 HR 图

图像的初始估计 $\tilde{f}_k^{(0)}$, 同时计算出偏移矢量; 然后进行两倍上采样, 作为偏移矢量的初始估计 $\tilde{a}_{l,k}^{(0)}$ 。这样不断循环迭代, 即可得重建 HR 图像。

3.5 计算复杂度分析^[16]

为方便计算, 主要考虑乘除计算, 即首先计算模糊降采样阵和高通算子操作, 大约要需 4 次快速傅里叶变换 (FFT) 和 $2(qM \times qN)$ 个实数乘除, 而每步迭代包含 4 次 FFT、 $4(qM \times qN)$ 个实数乘法, 然后再加上计算动态自适应正则参数 $\lambda(f_k)$ 需要的 $2(qM \times qN)$ 个实数相乘, 所以总的计算量约为

$$o\{4FFT + 2q^2MN + n[4FFT + 6q^2MN]\}$$

其中, n 为迭代次数。

4 仿真实验

为了验证算法的性能, 利用两组图像序列 (一组是合成的, 另一组是摄像机拍摄的实际图像序列) 来进行图像重建仿真实验。同时将文献 [10] 的正则化空域自适应 (regularized spatially adaptive, RSA) 算法与本文提出的空时自适应正则化 (regularized spatio-temporally adaptive, RSTA) 算法的重建性能进行比较。本文采用峰值信噪比 (PSNR) 来衡量算法的性能, 而用准则 $\frac{\|f_k^{(n+1)} - f_k^{(n)}\|^2}{\|f_k^{(n)}\|^2} \leq 10^{-6}$ 来终止迭代。

实验中, 参数设为 $\beta = 0.2$, D_1 和 D_2 是 2 维离散拉普拉斯高通滤波函数, 其中 D_1 用于块卷积操作, D_2 用于沿块边沿进行差值操作。为了测试运动估计对不同方法的独立性, 当编码器提供运动矢量时, 则式 (13) 中的参数选取为 $\alpha_{l,k} = 0.5$, $\delta = 2$, 否则 $\alpha_{l,k} = 0$ 。

4.1 合成序列的实验

第 1 个实验, LR 图像产生于 HR “mobile” 序列的第 5 帧, 尺寸为 352×288 pixels, 实验时, 像素先以 $\{(0,0), (0,0.5), (0.5,0), (0.5,0.5)\}$ 方式平移; 然后在水平和垂直方向进行抽样, 再经过模糊函数是 2×2 的运动平均滤波, 产生出 4 个 176×144 pixels 的 LR 序列; 接着利用 JPEG 编码器产生出压缩图像, 即通过调节编码量化参数, 得到不同的压缩码率。实验分别对 RSA 和 RSTA 算法进行测试, 用码率和峰值信噪比曲线来描述重建图像的性能, 其重建图像的 PSNR 曲线如图 2 所示。

为节省篇幅, 本文只列出 1.0bpp 码率下的重建图像。原始 HR 图像和压缩的 LR 图像如图 3(a)、图 3(b) 所示, RSA 和 RSTA 算法重建的图像分别如图 3(c)、图 3(d) 所示, 其 PSNR 值分别为 30.48dB 和 30.87dB。

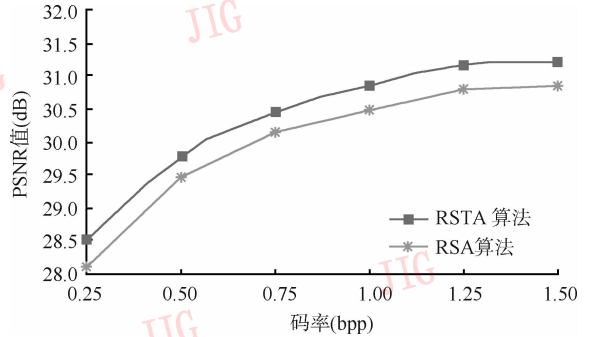


图 2 合成图像序列在不同码率下重建图像的 PSNR 曲线
Fig. 2 PSNR for different bit/pixel from synthetic sequence

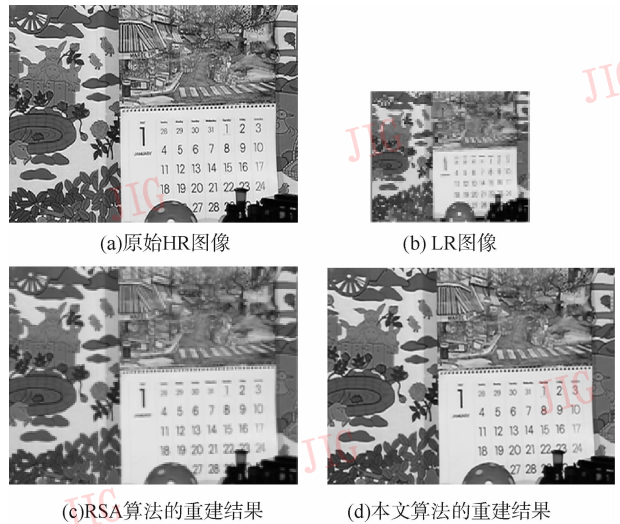


图 3 合成图像序列的实验结果

Fig. 3 Results from synthetic image sequence

4.2 真实图像序列实验

第 2 个实验, HR 序列是在摄像机轻微摇移下拍摄到的, 尺寸为 720×576 pixels, 该序列有两点不同于合成的序列: 首先, 图像间的子像素偏移不再是精确定义的, 而是与场景的运动有关; 其次, HR 图像的 (所有) 像素可能不在 LR 图像中出现, 有些像素可能从未观察到 (如果场景中没有运动) 或者它们在时间轴上看不到。本文实验是利用分级块匹配算法^[17]对 LR 图像进行校准, 其他参数同合成序列实验。各算法的峰值信噪比曲线如图 4 所示。

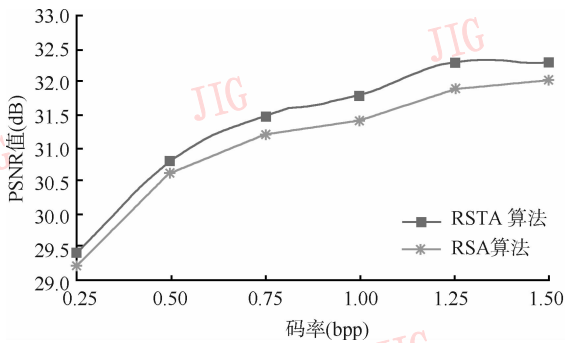


图 4 真实图像序列在不同码率下重建图像的 PSNR 曲线

Fig. 4 PSNR for different bit/pixel from real image sequence

与合成序列实验相似,图 5 为在 1.0bpp 码率下的实验结果。原始 HR 图像和压缩的 LR 图像如图 5(a)、图 5(b)所示,RSA 和 RSTA 算法重建的图像分别如图 5(c)、图 5(d)所示,其 PSNR 值分别为 31.42dB 和 31.79dB。



图 5 真实图像序列的实验结果

Fig. 5 Results from real image sequence

从以上两个实验可以看到,对合成的图像序列而言,重建图像的 PSNR 曲线上升得较平滑;而对真实的图像序列而言,重建图像的 PSNR 曲线波动较大。这主要是由于二者运动估计的精确性不同所引起的,显然,合成图像序列比真实图像序列的运动估计精确。

另外,由于 RSA 算法会引入编码效应,而且振铃效应和块效应可见,因而重建的图像过于平滑。这主要是由于该算法忽视了原始图像序列空时变化的特性而导致的量化噪声过大所致。而 RSTA 算法

则在整幅重建方面显示出相当的优势。其在重建过程中,由于 HR 图像可自适应地迭代更新,且正则化参数也能同时得到,因此不仅编码效应被去除,而且边沿和细节等高频信息被有效重建,从而使整幅图像的质量被提高。显然,这是由于利用了图像统计特性和空时变化特征,从而能够自适应调整 SR 的重建过程所致。

5 结 论

本文针对压缩的图像,提出了一种新颖的空时自适应超分辨率重建算法。该算法先用正则化代价函数来平衡时域数据和空间先验信息,而正则化操作则用来获取图像序列的空时相关性,然后利用迭代梯度下降法来求解 HR 图像,而正则化参数在迭代的过程中可同时得到。仿真实验表明,本文提出的超分辨率算法与传统的算法相比,重建图像的主、客观质量有一定的提高,适合于压缩图像的应用。

参考文献 (References)

- Kang M G, Katsaggelos A K. Simultaneous multichannel image restoration and estimation of the regularization parameters [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 1997, **6**(5): 774 ~ 778.
- Lee E S, Kang M G. Regularized adaptive high-resolution image reconstruction considering inaccurate subpixel registration [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2003, **12**(7): 826 ~ 837.
- Shen Huan-feng, Li Ping-xiang, Zhang Liang-pei. A regular ized super-resolution image reconstruction method [J]. Journal of Image and Graphics, 2005, **10**(4): 436 ~ 440. [沈焕锋,李平湘,张良培.一种基于正则化技术的超分辨率影像重建方法[J].中国图象图形学报,2005,**10**(4):436~440.]
- Yang Y, Galatsanos N, Katsaggelos A K. Projection-based spatially adaptive image reconstruction of block transform compressed images [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 1995, **4**(7): 896 ~ 908.
- Hong M C, Yon C M, Park Y M. An efficient real time algorithm to simultaneously reduce blocking and ringing artifacts in compressed video [A]. In: Proceedings of International Conference on Image Processing[C], Kobe, Japan, 1999:899 ~ 903.
- Wu Xian-jin, Wang Run-sheng. Adaptive regularized image restoration based on noise distribution estimated in wavelet domain [J]. Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics, 2006, **18**(14):502 ~ 506. [吴显金,王润生.小波域噪声分布估计的自适应正则化图像恢复[J].计算机辅助设计与图形学学报,2006,**18**(14):502~506.]
- Choi M G, Galatsanos N P, Katsaggelos A K. Multichannel

- regularized iterative restoration of motion compensated image sequences[J]. Visual Communications Image Representation, 1996, 7(3): 244 ~ 258.
- 8 Altunbasak Y, Patti A J, Mersereau R M. Super-resolution still and video reconstruction from MPEG coded video[J]. IEEE Transactions on Circuits and System for Video Technology, 2002, 12 (4): 217 ~ 226.
- 9 Gunturk B K, Altunbasak Y, Mersereau R M. Super-resolution reconstruction of compressed video using transform-domain statistics [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2004, 13 (1): 33 ~ 43.
- 10 Park S C, Kang M G, Segall C A, *et al.* Spatially adaptive high-resolution image reconstruction of low-resolution DCT-based compressed images [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2004, 13(4): 573 ~ 585.
- 11 Segall C A, Molina R, Katsaggelos A K. High-resolution images from low-Resolution compressed Video[J]. IEEE Signal Processing Magazine, 2003, 20(3): 37 ~ 48.
- 12 Segall C A, Katsaggelos A K, Molina R, *et al.* Bayesian resolution enhancement of compressed video[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2004, 13(7): 898 ~ 911.
- 13 Kang M G, Katsaggelos A K. General choice of the regularization functional in regularized image restoration[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 1995, 4(5): 594 ~ 602.
- 14 Hu He, Kondi L P. An Image Super-Resolution algorithm for different error levels per frame [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2006, 15(3): 592 ~ 603.
- 15 Mateos J, Katsaggelos A K, Molina R. Resolution enhancement of compressed low resolution video [A]. In: Proceedings of International Conference on Speech, Signal Processing [C], Istanbul, Turkey, 2000, 6: 1919 ~ 1922.
- 16 Han Yu-bing, Wu Le-nan. Super resolution reconstruction of video sequence based on adaptive filter[J]. Chinese Journal of Computer, 2006, 29(4): 642 ~ 647. [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(4): 642 ~ 647.]
- 17 Bierling M. Displacement estimation by hierarchical block matching [A]. In: Proceedings of SPIE Visual Communications and Image Processing [C], Cambridge, MA, USA, 1988, 1001: 942 ~ 951.