

一种频率域解混叠的 CCD 图像超分辨重建方法*

赵秀影^{1,2}, 苏 耘², 王敬梅³, 徐正平^{1,4}, 翟林培¹

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 长春 130033; 2. 空军航空大学, 长春 130022; 3. 青岛城市建设投资(集团)有限责任公司, 山东 青岛 266071; 4. 中国科学院 研究生院, 北京 100039)

摘要:在不增大光学系统的焦距,也不缩小 CCD 器件阵元的宽度的情况下,为了获得高分辨率的图像,对多幅具有互补信息的低分辨率图像进行研究。首先,把多幅具有互补信息的低分辨率图像通过傅里叶变换到频率域;接着,对频率域中高分辨与低分辨率图像之间关系进行建模,进而得到它们之间的关系;然后,通过对模型求解,得到高分辨率图像的频率值;最后,进行傅里叶反变换即可得到高分辨率图像。实验结果表明,该重建方法获得的高分辨率影像在视觉上比用任意一帧影像经过双线性插值获得的影像要清晰得多,与实际摄取高一倍的分辨率影像几乎达到一样。对 bridge 图像的恢复峰值信噪比可以达到 34.767 3 dB。该方法是切实可行的,且恢复图像边缘视觉效果好。

关键词:傅里叶变换;超分辨恢复;亚像素;频率域

中图分类号: TP391 文献标志码: A 文章编号: 1001-3695(2010)01-0368-03

doi:10.3969/j.issn.1001-3695.2010.01.110

Kind of reconstruction method of CCD aliasing image in frequency domain

ZHAO Xiu-ying^{1,2}, SU Yun², WANG Jing-mei³, XU ZHeng-ping^{1,4}, HAI Lin-pei¹

(1. Changchun Institute of Optical Fine Mechanics & Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China; 2. Aviation University of Air Force, Changchun 130022, China; 3. Qingdao Urban Construction Investment (Group) Co., Ltd., Qingdao Shandong 266071, China; 4. School of Graduate, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

Abstract: At the case of not increasing the focal length of the optical system, and not narrowing the array element width of CCD devices, in order to reconstruct super-resolution images, researched multi-frames of under-sampled low-resolution images with the complementary information. First, they transformed multi-frames of under-sampled low-resolution images with the complementary information to the frequency domain by the Fourier transformation. Secondly, in the frequency domain, modeled the relationship between super-resolution image and the low-resolution images, which could get the relationship between them. Thirdly, acquired the frequency values of super-resolution images by solving the model. Finally, got super-resolution images from the frequency values of super-resolution image by the Fourier inverse transformation. The experimental results show that; this reconstruction method can obtain much more clearly super-resolution image in the visual than the recovered super-resolution image through the bilinear interpolation to an arbitrary low-resolution image, almost achieve the same with the actual intake of one times high super-resolution image. PSNR of the restoration of the bridge image can be achieved 34.767 3 dB. Computer simulations demonstrate the performance of the algorithm. So this method is practicable, and the restored image has good edge visual effects.

Key words: Fourier transform; super-resolution restoration; sub-pixel; frequency domain

图像的空间分辨率是指图像的单个像素所对应的地面尺寸。获得高空间分辨率的航空图像最直接的方法是增大光学系统的焦距或缩小 CCD 阵元的宽度。但焦距增大会使光学器件的加工难度增大、费用增高,导致航空器的体积和重量增大等一系列难题;减小 CCD 阵元宽度会使感光度降低、信噪比减小、动态范围变小,带来灵敏度损失等问题,而且,制作高密度小像元尺寸的 CCD 也受到制作工艺及量子效率等因素的限制。由于国防和军事应用的原因,高分辨率的 CCD 一直是国际上出口限制的器件。寻找一种能够利用现有低分辨力的 CCD 来获得高分辨率的数字图像的方法,对于我国更具有迫切性。本文中所用的超分辨率图像生成技术主要是将具有相似而不同却又相互补充信息的已配准图像融合到一起,得到非均匀采样的较高分辨率数据,然后通过频率域和空间域的重建处

理,生成均匀采样的超分辨率数据。其基本过程如图 1 所示。

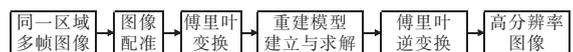


图 1 图像超分辨重建的基本过程

1 信号混叠频谱与原信号频谱之间关系推导

1.1 一维欠采样引起的信号混叠频谱与原信号频谱之间关系推导

对于频谱为 $F(\omega)$ 的一维信号 $f(t)$, 如果它时间有限(在 $t=0 \sim l$ 外为 0) 和频率带宽有限($|\omega| \geq B$ 有 $F(\omega) = 0$), 就可以选择整数 N 使之满足 $2\pi/(l/N) = 2B$, 则以间隔 $T = l/N$ 即以大于 $\omega = 1/T$ 采样频率对 $f(t)$ 进行采样(Nyquist 采样)将不

收稿日期: 2009-04-03; 修回日期: 2009-05-06 基金项目: 国家“863”计划资助项目(2007AA701203)

作者简介: 赵秀影(1972-), 女, 博士, 主要研究方向为机械电子与信息处理(yingzi9906@yahoo.com.cn); 翟林培(1945-), 男, 研究员, 主要研究方向为机械电子与信息处理。

会使相应频谱发生混叠,原连续信号 $f(t)$ 也可以根据这些样本重建出来。实际获取的一维影像则是以 $T = LT$ 为间隔对连续影像采样的结果。

$f(t)$ 的离散 Fourier 变换 (DFT) 对为

$$\left\{ \begin{array}{l} \tilde{F}(k2\pi/(NT)) = \sum_{n=0}^{N-1} f(nT) e^{-j2\pi k n T / NT} \\ f(nT) = (1/N) \sum_{n=0}^{N-1} \tilde{F}(k2\pi/(NT)) e^{-j2\pi k n T / NT} \end{array} \right\} \quad (1)$$

其中: $\tilde{F}(\ast)$ 是 f 的离散 Fourier 变换,设信号 f 的连续 Fourier 变换是 $F(\ast)$,则有

$$\begin{aligned} \tilde{F}(\omega) &= \sum_{n=0}^{N-1} f(nT) e^{-j\omega n T} = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} f(nT) e^{-j\omega n T} = \\ &= \sum_{n=-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) e^{-j\omega t} \delta(t - nT) dt = \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) e^{-j\omega t} \sum_{n=-\infty}^{+\infty} \delta(t - nT) dt = \\ &= \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) e^{-j\omega t} (1/T) \sum_{n=-\infty}^{+\infty} e^{-jn2\pi T t} dt = (1/T) \sum_{n=-\infty}^{+\infty} F(\omega + n2\pi/T) \end{aligned}$$

那么,可以推出,对于 $0 \leq k \leq N$ 内 $\tilde{F}(\ast)$ 的离散频谱点有

$$\begin{aligned} \tilde{F}(k2\pi/l) &= \tilde{F}(k2\pi/NT) = (1/T) \sum_{n=-\infty}^{+\infty} F(k2\pi/(NT) + n2\pi/T) = \\ &= (1/T) \sum_{n=-\infty}^{+\infty} F((k+nN)2\pi/l) = \\ &= \begin{cases} (1/T) F(k2\pi/NT) (0 \leq k < [(N+1)/2]) \\ (1/T) F((k-N)2\pi/(NT)) ([(N+1)/2] \leq k \leq N) \end{cases} \end{aligned}$$

其中: $[\ast]$ 表示取整。 N 可取 Bl/π 的下限,即不小于 Bl/π 的最小整数。此时, $F(\omega)$ 在 $|\omega| \leq 2\pi/T$ 外为 0, $F(k2\pi/(NT))$ 在 $-[N/2] \leq k < [(N+1)/2]$ 外为 0。

现在以 $T_q = (L/N_q)$ ($N_q < N$) 间隔对 $f(t)$ 进行采样,则这一采样必为欠采样,对应频谱就会发生混叠现象,而发生混叠之 DFT 谱 $\tilde{F}_q(\ast)$ 与未混叠之 CFT 谱 $F(\ast)$ 之间有如下关系:

$$\begin{aligned} \tilde{F}_q(k2\pi/(N_1 T_1)) &= \sum_{n=0}^{N_q-1} f(nT_q) e^{-j2\pi k n T_q} = \\ (1/T_q) \sum_{n=-\infty}^{+\infty} F(k2\pi/l + n2\pi/T_q) &= (1/T_q) \sum_{n=-\infty}^{+\infty} F(k + nN_q) 2\pi/l = \\ (N_q/N) \left\{ \begin{array}{l} \sum_{0 \leq k + nN_q < [(N+1)/2]} F((k + nN_q) 2\pi/l) + \\ \sum_{-[N/2] \leq k + nN_q < 0} F((k + N + nN_q) 2\pi/l) \end{array} \right\} \quad (2) \end{aligned}$$

其中: k 从 $0 \sim N_q - 1$ 取值。

1.2 二维欠采样引起的信号混叠频谱与原信号频谱之间关系推导

对于频谱为 $F(u, v)$ 的二维信号 $f(x, y)$,若它在时(空)域内有限 ($0 \leq x \leq l_x$ 和 $0 \leq y \leq l_y$, 外 $f(x, y) = 0$) 和频域有限 ($|u| \geq B_u$ 和 $|v| \geq B_v$ 时,有 $F(u, v) = 0$),就可选择整数 N_x, N_y 使之满足 $2\pi/(l_x/N_x) \geq 2B_x$ 和 $2\pi/(l_y/N_y) \geq 2B_y$ 。则以间隔 $T_x = l_x/N_x$ 和 $T_y = l_y/N_y$ 对 $f(x, y)$ 进行的采样将不会使相应二维频谱发生混叠,原连续二维信号也便可以通过其 $N_x \times N_y$ 个样本来重构。与一维情形类似,二维信号 $f(x, y)$ 离散 Fourier 变换 (DFT) 对为

$$\left\{ \begin{array}{l} \tilde{F}(k_u \frac{2\pi}{l_x}, k_v \frac{2\pi}{l_y}) = \sum_{n_x=0}^{N_x-1} \sum_{n_y=0}^{N_y-1} f(n_x T_x, n_y T_y) e^{-j2\pi(\frac{k_u n_x}{N_x} + \frac{k_v n_y}{N_y})} \\ f(n_x T_x, n_y T_y) = \frac{1}{N_x N_y} \sum_{n_x=0}^{N_x-1} \sum_{n_y=0}^{N_y-1} \tilde{F}(k_u \frac{2\pi}{l_x}, k_v \frac{2\pi}{l_y}) e^{j2\pi(\frac{k_u n_x}{N_x} + \frac{k_v n_y}{N_y})} \end{array} \right\} \quad (3)$$

其中: $\tilde{F}(\ast, \ast)$ 是 f 的离散 Fourier 变换。设信号 f 的连续 Fourier 变换为 $F(\ast, \ast)$, 现对 $f(x, y)$ 以 $T_{x1} = l_x/N_{x1}$ 和 $T_{y1} = l_y/N_{y1}$ ($N_{x1} < N_x$ 或 $N_{y1} < N_y$) 进行采样,则这一采样必为欠采样,同样会使其二维频谱发生混叠。与一维式(2)类似,也可建立混叠之 DFT 谱与未混叠之 DFT 谱之间的联系:

$$\tilde{F}(k_u \frac{2\pi}{l_x}, k_v \frac{2\pi}{l_y}) = \frac{N_{x1} N_{y1}}{N_x N_y} \sum_{n_x, n_y} \tilde{F}(k_u + n_x N_{x1}, k_v + n_y N_{y1}) \quad (4)$$

其中: k_u 从 $0 \sim N_{x1} - 1$ 取值, k_v 从 $0 \sim N_{y1} - 1$ 取值,以及

$$\sum_{n_x, n_y} \tilde{F}(\hat{n}_x, \hat{n}_y) = \sum_{\substack{0 \leq n_x < [(N_x+1)/2] \\ 0 \leq n_y < [(N_y+1)/2]}} F(\hat{n}_x 2\pi/l_x, \hat{n}_y 2\pi/l_y) + \sum_{\substack{[N_x/2] \leq n_x < N_x \\ [N_y/2] \leq n_y < N_y}} F(\hat{n}_x + N_x) 2\pi/l_x, (\hat{n}_y + N_y) 2\pi/l_y$$

式(4)即为一个二维信号的频谱混叠公式。其中, k 从 $0 \sim N_1 - 1$ 取值。显然, N_1 与信号的分辨率相关联。

2 影像重建模型

2.1 一维重建模型

从式(2)可以得到两个频谱之间关系的矩阵表示:

$$\begin{bmatrix} F_q[0] \\ \hat{u} \\ F_q[N_1 - 1] \end{bmatrix} = \frac{N_q}{N} \begin{bmatrix} 1 & & \\ & \hat{u} & \hat{u} \\ & & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F[0] \\ \hat{u} \\ F[N_1 - 1] \end{bmatrix} \quad (5)$$

并可简单记做矢量变换形式 $F_q = \alpha_q A_q F$ 。其中: $\alpha_q = N_q/N$; 矩阵 A_q 为频谱混叠矩阵。

如果信号 $f(t)$ 有时延 δ , 则 $f(t - \delta)$ 的频谱为 $F_\delta(\omega) = e^{-j\omega\delta} F(\omega)$ 。此时, $F_\delta[k] = e^{-j2\pi\delta k/NT} F[k]$ 。如令 $D_\delta = \text{diag}(1, e^{-j2\pi\delta/NT}, \dots, e^{-j(N-1)2\pi\delta/NT})$, 则有时延情形下的频谱混叠变换就是 $F_\delta = D_\delta F$ 。

如果信号 $f(t)$ 有模糊性退化,而且如果这种退化过程是线性的,则其相应频谱可表示为 $F_h(\omega) = H(\omega) F(\omega)$ 。此时, $F_h[k] = H[k] \cdot F[k]$ 。记 $H = \text{diag}(H[0], H[1], \dots, H[N-1])$, 同样可有频谱混叠变换的离散表达式 $F_h = HF$ 。此时,若 $H[k]$ 有零点出现,则也会引起频谱变换亏秩。

如果再考虑到采样过程中可能混入的加性随机噪声矢量的频谱 N , 则包含采样间隔、相对时延、滤波函数及随机噪声等信息的一维信号频谱混叠一般模型为

$$F_{\delta_q, h_q, q} = \alpha_q A_q D_\delta H_q F + N_q \quad (6)$$

对于一维信号,根据式(6),在不考虑采样过程中可能混入的随机噪声情形下, p 组欠采样值的 DFT 谱与未混叠之理想 DFT 谱之间存在如下关系:

$$\begin{cases} F_{\delta_1, h_1, 1} = \alpha_1 A_1 D_{\delta_1} H_1 F \\ \hat{u} \\ F_{\delta_p, h_p, p} = \alpha_p A_p D_{\delta_p} H_p F \end{cases} \text{ 或 } \begin{cases} F_{\delta_1, h_1, 1} \\ \hat{u} \\ F_{\delta_p, h_p, p} \end{cases} = \begin{bmatrix} \alpha_1 A_1 D_{\delta_1} H_1 \\ \hat{u} \\ \alpha_p A_p D_{\delta_p} H_p \end{bmatrix} \times F = \begin{bmatrix} \Phi_1 \\ \hat{u} \\ \Phi_p \end{bmatrix} \times F = \Phi \times F$$

可得,在每一给定的离散频率点 n 处,有

$$G_n = \Phi_n F_n \quad (7)$$

即

$$F_n = (\Phi_n \Phi_n^*)^{-1} \Phi_n^* G_n \quad (8)$$

其中: Φ_n^* 为 Φ_n 的共轭转置; G_n 为 $p \times 1$ 维的列向量,第 q 个元素值为 $F_q(n)$; F_n 为 $2L \times 1$ 维的列向量,第 i 个元素值为 $F(2\pi((n/NT) + (i-L-1)\omega_s))$; Φ_n 为 $p \times 2L$ 维的矩阵,第 (k, j) 个元素值为 $T^{-1} \exp(j2\pi\delta_{k-1}((n/NT) + (j-L-1)\omega_s))$ 。此式即为一维重建模型。当采样帧数 $p \geq 2L$ 时,对每一个离散频率点 n ,可由式(6)分别解出未知的列向量 F_n, F_n 即为 $F(\omega)$ 在间隔为 $\omega_s/2L$ 个等频率点的一系列值。

解出所有的离散频率点处的 F_n , 从而可得到 $F(\omega)$ 在 $2LN$ 个点上的频率域样本值。由 DFT 的特性知,此 $2LN$ 个频率域样本值可用来估计 $f(x)$ 在空间域采样后周期长度为 NT 内的 $2LN$ 个样本值。因此,空间域内的样本值估计之间的距离/分

分辨率为 $NT/(2LN) = T/(2L)$, 即分辨率相对于原欠采样率改善了 $2L$ 倍, 提高 $2L - 1$ 倍。

2.2 二维重建模型

与一维类似, 如果二维信号的采样方式为严格的矩形网格点采样, 对二维信号也可建立混叠之 DFT 频谱 $F_q[*,*]$ 与未混叠之理想 DFT 频谱 $F[*,*]$ 之间的联系:

$$\begin{bmatrix} F_q[0,0] & \cdots & F_q[N_x - 1,0] \\ \vdots & & \vdots \\ F_q[0,N_y - 1] & \cdots & F_q[N_x - 1,N_y - 1] \end{bmatrix} = \frac{N_x N_y}{N_x N_y} \mathbf{A}_q \begin{bmatrix} F[0,0] & \cdots & F[N_x - 1,0] \\ \vdots & & \vdots \\ F[0,N_y - 1] & \cdots & F[N_x - 1,N_y - 1] \end{bmatrix} \mathbf{A}_q^T \quad (9)$$

并可简单记为矩阵变换形式 $F_q = \alpha_x \alpha_y \mathbf{A}_x \mathbf{A}_y^T$ 。其中 $\alpha_x = N_x/N_x, \alpha_y = N_y/N_y, \mathbf{A}_x$ 和 \mathbf{A}_y 分别为二维信号在 x 和 y 方向上之频谱混叠矩阵, 其定义与一维相同。

在有二维时延(相对位移)情况下, 用 δ_x 和 δ_y 分别表示在 x 和 y 方向上的相对位移量, 与一维类似, 可有 $F_{\delta_x, \delta_y} = D_{\delta_x} F D_{\delta_y}$ 。如果 $f(x,y)$ 有模糊性退化, 而且如果这种退化过程(点扩展函数)是线性的和在 x 和 y 方向上是可分离的(分别用 H_x 和 H_y 表示, 可以是时变的), 则对应二维频谱混叠的模型可表示为 $F_{h_x, h_y} = H_x F H_y$ 。在 $N_x < N_x$ 或 $N_y < N_y$ 时频谱发生混叠, 或者 H_x 或 H_y 含有零点, 均会使变换亏秩。

再考虑采样过程中可能混入的随机噪声 N , 则包含分辨率、相对位移量、点扩展函数及随机噪声等信息的二维信号(图像)频谱混叠一般模型可以表示为

$$F_{\delta_x, \delta_y, h_x, h_y, q} = \alpha_x \alpha_y \mathbf{A}_x D_{\delta_x} H_x F H_y D_{\delta_y} \mathbf{A}_y^T + N \quad (10)$$

当然, 对于发生了混叠的频谱, 由于频谱的混叠过程相当于是一个降秩变换, 这一过程也是不可逆的, 单单从一个这样的变换去求逆解混叠是不可能的。要进行频谱解混叠, 还必须要有信号多通道或多次欠采样值, 才可以从同一个原始信号的多个相异的降秩变换来实现求逆。

同一维重建一样, 可得到二维重建模型为

$$G_{mn} = \varphi_{mn} F_{mn} \quad (11)$$

即

$$\begin{aligned} G_{mn} &= [F_0(m,n) F_1(m,n) \cdots F_{p-1}(m,n)]^T \\ F_{mn} &= [F_{mn}(0) F_{mn}(1) \cdots F_{mn}(4L_x L_y - 1)]^T \\ \varphi_{mn} &= \begin{bmatrix} \phi_{00} & \phi_{01} & \cdots & \phi_{0, L_x L_y - 1} \\ \phi_{10} & \phi_{11} & \cdots & \phi_{1, L_x L_y - 1} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \phi_{p-1, 0} & \phi_{p-1, 1} & \cdots & \phi_{p-1, L_x L_y - 1} \end{bmatrix} \\ F_{mn}(i) &= F(m/MT_1 + r\omega_{x1}, n/nT_2 + s\omega_{y2}) \\ \phi_{ki} &= (1/T_x T_y) \exp\{j2\pi(\delta_{kx}(m/MT_1 + r/T_1) + \delta_{ky}(n/nT_2 + s/T_2))\} \\ &\text{这里 } r = i \bmod (2L_x) - L_x, s = [i/(2L_x)] - L_y \\ F_{mn} &= (\varphi_{mn}^* \varphi_{mn})^{-1} \varphi_{mn}^* G_{mn} \end{aligned} \quad (12)$$

其中: φ_{mn}^* 为 φ_{mn} 的共轭转置; G_{mn} 为 $p \times 1$ 维的列向量, 第 k 个元素值为 $F_k(m,n)$; F_{mn} 为 $4L_x L_y \times 1$ 维的列向量, 第 i 个元素值为 $F(2\pi(m/MT_1 + r\omega_{x1}, n/nT_2 + s\omega_{y2}))$, $r = i \bmod (2L_x) - L_x, s = [i/(2L_x)] - L_y$; φ_{mn} 为 $p \times 4L_x L_y$ 维的矩阵, 第 (k,l) 个元素值为 $4/(T_x T_y) \exp\{j2\pi((\delta_{k1}(m/MT_1 + r/T_1) + \delta_{k2}(n/nT_2 + s/T_2)))\}$ 。位移量 δ_{k1}, δ_{k2} 通过运动模型估计确定。当采样帧数 $p \geq 4L_x L_y$ 时, 同一维重建分析, 空间域内的样本值估计之间的距离/分辨率在 x 方向上为 $MT_1/(2L_x M) = T_1/(2L_x)$, 在 y 方

向上为 $NT_2/(2L_y N) = T_2/(2L_y)$, 即重建影像的分辨率相对于原欠采样率在 x 方向上改善了 $2L_x$ 倍, 提高 $2L_x - 1$ 倍; 在 y 方向上改善了 $2L_y$ 倍, 提高 $2L_y - 1$ 倍。

3 频率域图像超分辨重建的一般步骤

- 将 p 帧互有位移的低分辨率图像数据通过快速傅里叶变换(FFT)从空间域变换到频率域;
- 频率与图像超分辨重建模型(式(11))的建立;
- 模型求解(式(12)), 求出 $2L_x M \times 2L_y N$ 个频率域样本值;
- 通过快速傅里叶逆变换(IFFT), 将 $2L_x M \times 2L_y N$ 个频率域样本值变换到空间域, 即可获得空间域分辨率提高的影像。用于重建的图像帧数必须满足 $p \geq 4L_x L_y$, 模型才有惟一解。

4 实验结果及分析

实验采用两组互有 0.5 像素位移的低分辨率图像采用本文超分辨重建方法进行超分辨恢复, 结果如图 2、3 所示, 峰值信噪比(PSNR)对照如表 1 所示。

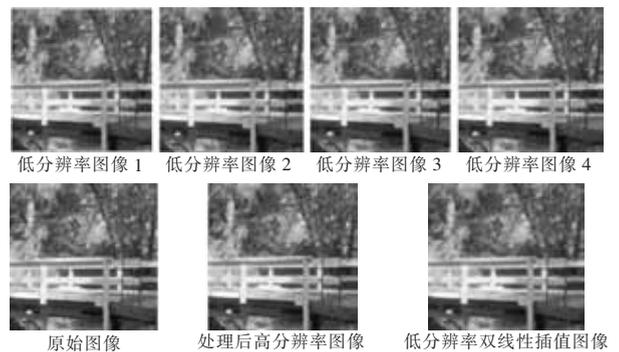


图 2 Bridge 图像的超分辨恢复结果对照



表 1 PSNR 对比

	双线性插值	本文方法
bridge	34.567 0	34.767 3
woman	29.348 6	29.579 4

5 结束语

实验结果表明, 本文的频谱解混叠重建方法获得的高分辨率影像比用任意一帧影像经过双线性插值获得的影像要清晰得多, 与实际摄取高一倍分辨率影像几乎达到一样。对于 bridge 图像进行恢复重建, 峰值信噪比可以达到 34.767 3 db。超分辨率图像生成技术, 具有广阔的应用前景, 可切实有效地应用于军事和国民生产中。

K 帧采用 H. 264 中的模式判决方法进行模式判决。

c) $k = k + 1$, 重复 b), 直到最后一帧。

4 实验结果和分析

本文给出的快速模式判决算法集成于 H. 264 的参考软件 JM13.2 中, 然后进行性能比较。实验中, 主要用三个指标评价算法性能, 即重建图像质量的差值 ΔPSNR , 输出码率的升高 Δbit 和节省编码时间 Δtime , 分别定义如下:

$$\Delta\text{PSNR} = \text{PSNR}_{\text{proposed}} - \text{PSNR}_{\text{full}} \quad (8)$$

$$\Delta\text{bit} = (\text{bit}_{\text{proposed}} - \text{bit}_{\text{full}}) / \text{bit}_{\text{full}} \quad (9)$$

$$\Delta\text{time} = (\text{time}_{\text{full}} - \text{time}_{\text{proposed}}) / \text{time}_{\text{full}} \quad (10)$$

下标 proposed 表示采用本文算法或文献[7]算法的测试值, full 则表示采用 RDO 的 H. 264 编码器的测试值。计算机平台为 Intel Celeron 1.70 GHz CPU, 512 MB RAM, Windows XP 操作系统。在 IPPP...、RDO 模式下进行编码, 结果如表 1、2 所示。

表 1 实验结果对比 ($QP = 28$)

序列	帧频/Hz	本文算法			文献[7]算法		
		$\Delta\text{PSNR}/\text{dB}$	$\Delta\text{bit}/\%$	$\Delta\text{time}/\%$	$\Delta\text{PSNR}/\text{dB}$	$\Delta\text{bit}/\%$	$\Delta\text{time}/\%$
salesman. qcif	30	-0.038	0.283	81.82	-0.02	0.42	52.16
container. qcif	30	-0.033	0.107	80.39	-0.03	0.27	56.47
news. qcif	30	-0.023	0.542	81.97	-0.01	0.25	58.36
silent. cif	15	-0.049	0.164	80.27	-0.02	-0.13	55.59
stefan. qcif	30	-0.041	0.135	76.96	-0.02	1.88	44.68
foreman. cif	15	-0.084	0.216	72.68	-0.05	0.38	43.16
costguard. cif	15	-0.071	0.351	74.13	-0.04	-0.48	45.92
mobile. cif	30	-0.042	0.431	62.23	-0.05	0.13	35.26
football. qcif	30	-0.093	1.236	72.56	-0.06	0.94	45.27
平均		-0.053	0.38	77.47	-0.03	0.41	48.54

表 2 实验结果对比 ($QP = 32$)

序列	帧频/Hz	本文算法			文献[7]算法		
		$\Delta\text{PSNR}/\text{dB}$	$\Delta\text{bit}/\%$	$\Delta\text{time}/\%$	$\Delta\text{PSNR}/\text{dB}$	$\Delta\text{bit}/\%$	$\Delta\text{time}/\%$
salesman. qcif	30	-0.046	0.324	83.25	-0.03	0.77	58.24
container. qcif	30	-0.051	0.218	82.34	-0.04	0.49	60.93
news. qcif	30	-0.053	0.249	83.36	-0.04	0.12	59.26
silent. cif	15	-0.062	0.384	83.42	-0.01	0.30	61.04
stefan. qcif	30	-0.092	0.263	78.25	-0.04	2.82	48.12
foreman. cif	15	-0.106	0.287	74.92	-0.05	-0.25	45.61
costguard. cif	15	-0.095	0.491	77.63	-0.04	0.11	48.51
mobile. cif	30	-0.061	0.904	65.78	-0.06	1.06	45.11
football. qcif	30	-0.086	1.186	71.45	-0.09	1.74	44.55
平均		-0.072	0.478	77.82	-0.04	0.80	52.37

从表中可以看出, 本文算法在 $QP = 28$ 时可以平均减少 77.47% 编码时间, 同时编码质量平均下降 0.053 dB, 码率平均上升 0.38%; 在 $QP = 32$ 时可以平均减少 77.82% 编码时间; 同时编码质量平均下降 0.072 dB, 码率平均上升 0.478%。PSNR 的降低和码流的增加是由于过早排除较小概率的模式所致。

采用本文算法编码时间的缩短明显优于文献[7], 这是因为本文算法中统计编码宏块各模式的比率和 FAD 及图像复杂度的计算复杂度比文献[7]中的对 4×4 块运动矢量梯度的计算复杂度小得多。并且, 采用本文方案对于空间细节较少, 运动平缓的序列比较有效, 同时对图像细节复杂, 运动剧烈的序列也比较有效。原因分析: 本文的模式判决算法主要利用了编码模式的帧间时间相关性, 同时引入图像复杂度对图像空间相关性作自适应修正。一般来讲, 图像序列的细节越少或运动越简单, 宏块间的相关性就越强, 提前终止的可能性越大, 判决效果就越好, 从而快速算法的效果就越明显; 反之, 快速算法的效果就越差。

5 结束语

本文采用 H. 264 参考软件对 salesman、stefan、football 等视频序列的编码模式前后帧之间的相关性进行了分析, 相应提出了一种新的模式快速判决算法。该算法根据已编码宏块各模式的比率大小顺序来自适应地确定当前宏块模式判决顺序; 利用前帧中宏块编码模式的平均率失真及当前帧的图像复杂度自适应地预测当前帧宏块相应编码模式的阈值。新算法显著降低了编码器的计算复杂度, 而基本没有带来重建图像质量的降低和输出码率的升高。

参考文献:

- [1] ITU - T Rec. H. 264 / ISO / IEC 11496 - 10 Document JVT - G050 2003, Advanced video coding-final committee draft[S]. 2003.
- [2] 余成伟, 陆建华, 郑君里. H. 264 编码模式选择快速算法研究[J]. 清华大学学报: 自然科学版, 2007, 47(10): 1677-1680.
- [3] 朱红, 吴成柯, 方勇. H. 264 宏块模式的一种快速判决方案[J]. 电子学报, 2005, 33(9): 1576-1580.
- [4] 宋彬, 常义林, 李春林. H. 264 帧间预测模式的快速选择算法[J]. 电子学报, 2007, 5(4): 697-700.
- [5] 周泽建, 支, 王嘉. 一种基于 H. 264 的自适应快速模式选择算法[J]. 上海交通大学学报, 2007, 41(1): 149-156.
- [6] 尹明, 王宏远. 基于门限自适应的 H. 264 帧间模式快速选择算法[J]. 系统工程与电子技术, 2006, 28(6): 804-806.
- [7] BYSTROM M, RICHARDSON I, ZHAO Y. Efficient mode selection for H. 264 complexity reduction in a Bayesian framework[J]. Signal Processing: Image Communication, 2008, 23: 71-86.
- [8] SHEN Li-quan, LIU Zhi, ZHANG Zhao-yang, et al. Fast inter mode decision using spatial property of motion field[J]. IEEE Trans on Multimedia, 2008, 10(6): 1208-1214.
- [9] 潘吉彦, 胡波. 自适应帧组残差操作视频图像压缩算法[J]. 电路与系统学报, 2007, 12(6): 89-94.
- [10] 朱金秀, 李英才, 相里斌. 超分辨率图像重建技术的仿真实验研究[J]. 中国图象图形学报, 2001, 6(7): 629-635.
- [11] 刘其涛. 反演解析法提高 CCD 空间分辨率方法的修正及完善[J]. 电光与控制, 2006, 13(3): 33-35.
- [12] 周峰, 王世涛, 王怀义. 关于亚像元成像技术几个问题的探讨[J]. 航天返回与遥感, 2002, 23(4): 26-33.
- [13] 郝鹏威, 徐冠华, 朱重光. 数字图像空间分辨率改善的频率域方法[J]. 中国科学: E 辑, 1999, 29(3): 235-244.

(上接第 370 页)

参考文献:

- [1] 郝鹏威, 朱重光. 对不同分辨率图像进行空间分辨率改善的频率域方法[J]. 中国图象图形学报, 1998, 3(5): 358-362.
- [2] 周春大, 张岩. 基于微位移技术提高 CCD 分辨率的方法[J]. 光子学报, 2006, 35(12): 1969-1974.
- [3] 钦桂勤, 耿则勋, 徐青. 利用频带解混叠方法实现超分辨率影像重建[J]. 测绘学报, 2003, 32(2): 143-147.
- [4] 邵文译, 韦志辉. 基于广义 Huber-MRF 图像建模的超分辨率复原