

基于模糊聚类和网格变形的自适应时-空差错掩盖方法

郭秀江 朱秀昌

(南京邮电学院信息工程系 南京 210003)

摘要 当视频传输中出现不能恢复的误码或丢包时,在接收端就要使用差错掩盖技术对损坏的视频进行掩藏。该文提出了一种基于模糊聚类和网格变形的自适应差错掩盖方法,使得错误恢复效果提高。该方法首先用基于时-空的模糊聚类块匹配方法补偿平移运动场景中的块丢失,然后如果检测出丢失块所在的空间有旋转、缩放等复杂运动,则用基于网格变形的方法进行补偿。实验结果表明其 PSNR 值比 Luigi(2001)的 BMA-MBW 方法平均提高约 1.5dB,比传统的基于块匹配的方法平均提高约 3.5dB。

关键词 图像处理,模糊集,聚类分析,差错掩盖,网格变形

中图分类号: TN911.73 TN919.81

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2006)08-1447-05

An Adaptive Spatio-Temporal Concealment Method Using Fuzzy Classifying and Mesh Warping

Guo Xiu-jiang Zhu Xiu-chang

(Nanjing University of Posts & Telecommunications, Nanjing 210003, China)

Abstract When bit errors occur during transmission and cannot be corrected by an error correction scheme, error concealment is needed to mask damaged image at receiver. In this paper, a spatio-temporal error concealment algorithm based on fuzzy classify and mesh warping method is presented. The algorithm include two steps: First, the error blocks which are in the situation of pure translation are reconstructed. If the complicated motion such as rotation and zoom in or out is detected, the internal texture of each block is warped by a mesh-based affine transform, in order to comply with nontranslation. Experimental results show that the PSNR has been improved 1.5dB than the BMA-MBW, and 3.5dB than the BMA.

Key words Image processing, Fuzzy sets, Classify analysis, Error concealment, Mesh warping

1 引言

现在的视频编码标准如 MPEG-x, H.26x 系列都是基于块的混合编码方式,当这些编码器编出的码流在带宽限制的信道上传输时,由于信道的误码或网络的阻塞会造成接收端图像内块的丢失或视频质量的下降,有一些方法用来改善这种视频通信的质量,如 ARQ(Automatic Retransmission Request),前向纠错和差错掩盖的方法,在本文中采用差错掩盖的方法对接收端的差错或丢包图像的质量进行改善。差错掩盖分为两种,一种是空间方向上的,在基于 JPEG 压缩的图像和视频压缩中的 I 帧只能用这种方法,因为它没有时间方向上的信息可以利用;另外一种和时间方向上的,在这种方法中它不仅有时间方向上的信息,而且有时间方向上的信息可以利用。

编码后的视频码流中包含块的运动矢量(Motion Vector, MV)信息和 DCT 系数,当码流中的块丢失后,一般的 MV 信息也会丢失,这就需要对其 MV 进行恢复,文献[1]把 MV 置零或利用丢失块周围的 MV 信息的平均或中值方法恢复丢失块的 MV。文献[2]提出了一种线性内插的方法,在这种方法

中,丢失块的每一个像素都是用周围块 MV 的双线性内插。文献[3]提出了一种基于边界匹配(Boundary Matching Algorithm, BMA)的方法,在这种方法中,它用前一帧中和当前帧的周围边界像素的 MAD 最小的块的 MV 作为当前丢失块的 MV。文献[4]给出了一种重叠块运动补偿的方法。其他的一些方法也是利用了时间方向上的相关性来得到丢失块的 MV 信息。

在空间的差错掩盖方面也提出了很多的算法,文献[5]提出了一种最大平滑恢复的方法,它通过使丢失块和周围块的边界的最大平滑约束条件来恢复丢失块内的像素。文献[6]采用使周围 4 个相邻块的均方差最小和线性内插的方法来恢复丢失的块。文献[7]使用了只恢复 DCT 域的低频系数,并且把高频系数置零的方法来恢复丢失的块。另外还有基于凸集投影的方法^[8],它利用基于一致性、边缘连续性和最大平滑性的 3 个约束条件迭代地应用投影的方法得到丢失块的像素。

一般地,在有场景变换的区域和有快速运动、旋转和变形对象时,时间方向上的掩盖方法效果不好,另外,在用硬件实现时也将用到比较大的存储空间。空间方向的方法一般计算复杂度比较高,而且在恢复小的细节部分不理想并且会引起块效应或模糊现象^[9]。所以文献[9]中提出了一种基于边

界匹配和基于网格变形(BMA-MBW)的方法,这种方法分为两个步骤,它首先用基于边界匹配(BMA)算法基于边界信息,用前一解码帧的相应的块来代替丢失的块,然后用网格变形算法补偿因快速运动、旋转和对对象变形而造成的掩盖块的不准确。这种BMA-MBW的算法对有复杂运动和图像内对象变形的区域补偿效果较好,但在平滑区域,为了降低计算复杂度,不再进行网络变形。由于其在边界匹配算法中采用了一般的BMA算法,效果并不理想,其缺点就在其寻找相似块的过程中采用基于单一约束条件的最大边界平滑方法,没有考虑其中的纹理和边缘等因素,所以在有丰富图像细节而没有复杂运动和变形的区域,使得被掩盖的块模糊。本文在第2节中用模糊聚类方法改进了这个缺点。

如果在块匹配中用多个匹配准则进行逐一匹配,即每次选择一个特征量进行一次匹配,如先用最大像素边界平滑进行匹配,然后再用边缘连续特征量进行匹配,这种算法有两个缺点,首先,由于匹配是在一个窗口内进行搜索的过程,特别是在1/4像素精度搜索时,每次匹配的运算量较大,而如果把这两个特征量在匹配搜索前合成一个特征矢量,虽然要计算相似特征量和等价矩阵,其运算量仍比多次单一特征量匹配要小;其次,多次匹配得到的相似块可能不一致,而在模糊聚类方法中由于在相似匹配前就综合考虑了多特征量,所以,匹配出的块是基于多相似特征量的综合匹配块。从而模糊聚类方法比多次单一特征量匹配具有优越性。

以下第2节具体介绍了本文所提出的基于模糊聚类和网格变形的的方法,第3节给出了实验结果,第4节进行总结。

2 基于模糊聚类和网格变形的时-空差错掩盖算法

本文提出一种新的基于模糊聚类的时-空差错掩盖算法,它首先在前一帧的一个窗口内通过模糊聚类的方法寻找与当前帧中丢失的块最匹配的块来代替丢失的块,然后再用基于网格的仿射变换方法减少块效应。它的具体实施步骤如图1所示:

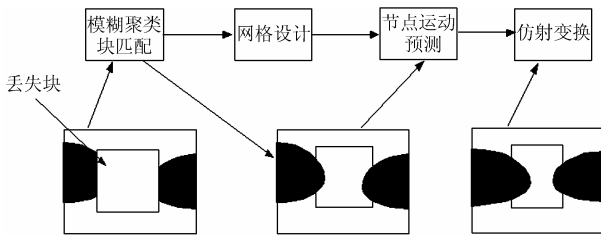


图1 基于聚类和网格变形的的方法框图

Fig.1 Flow chart of spatio-temporal concealment method using fuzzy classify and mesh warping

2.1 基于模糊聚类的时空块匹配算法

所谓聚类就是按照一定的要求和规律对事物进行区分和分类的过程。一般分类伴随着模糊性,模糊聚类的方法就是将模糊数学中的有关概念与方法引进聚类分析,通过建立模糊相似关系,进而对客观事物进行分类。本研究中引入这

一方法寻找丢失块的相似块,它符合图像相似的模糊特性,更重要的是可以进行基于多特征量的综合判决,从而使差错掩盖效果提高。

文献[3]提出了一种时-空块匹配的方法,并且为以后的许多文献所引用,它是通过最小化恢复块和周围相邻块的边界差值函数来在前一帧选择最佳匹配块,这种方法只是根据边界的最大平滑性获得最佳匹配块,这会造成恢复后的图像模糊,恢复效果不够理想。本文采用基于多特征量的模糊匹配方法能更加精确地在前一帧找到当前丢失块的最佳匹配块,它采用了基于像素的平滑和纹理特征多重特征量的模糊软判决方法,从而比单独采用最大边界平滑特征量的硬判决方法更能反应图像块的相似特性。

在进行相似块的模糊匹配时,假设丢失块在第 n 帧的位置已知,如图2所示,检测方法如文献[10]。设大小为 $N \times N$ 的丢失或差错块,它周围至少有两个已正确接收和解码的块(最好的情况下,如当采用交织编码时,周围的8个块都能正确解码)。此时,在第 $n-1$ 帧中相应于丢失块位置的周围大小为 $W \times W$ 的窗口内寻找某一个大小为 $N \times N$ 的块代替当前丢失的块,与第 n 帧丢失块周围的当前已正确解码的周围相邻块一起参与模糊聚类分析。

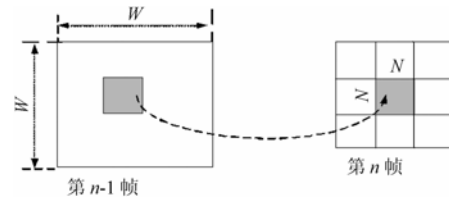


图2 时空模糊聚类示意图

Fig.2 Spatio-temporal fuzzy classify

下面描述本文的模糊聚类方法。丢失块的掩盖必须满足3个条件^[11]:

- (1) 光滑 掩盖后像素与相邻的像素必须光滑地连接。
- (2) 边缘连续 视频对象的边缘在掩盖后的块内和相邻的块内必须是连续的。
- (3) 像素相容 正确接收到的块内的像素点在处理后才能改变,恢复的像素值必须在(0-255)范围内。

因此,选择聚类的特征量为:匹配块的亮度均值 m_l 和方差 σ_l ,由使用 Sobel 算子检测到的 x 和 y 方向的边缘梯度均值 $T_x = \sum_{\text{block}} |G_x|$ 和 $T_y = \sum_{\text{block}} |G_y|$ 组成一个四维的块匹配特征矢量 $C = [m_l, \sigma_l, T_x, T_y]$ 。 T_x 和 T_y 分别反映了垂直和水平方向边缘分量的强度。

其中

$$\left. \begin{aligned} G_x &= 2[f(i+1, j) - f(i-1, j)] + f(i+1, j-1) \\ &\quad + f(i+1, j+1) - f(i-1, j-1) - f(i-1, j+1) \\ G_y &= 2[f(i, j+1) - f(i, j-1)] + f(i-1, j+1) \\ &\quad + f(i+1, j+1) - f(i-1, j-1) - f(i+1, j-1) \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

假设待分类的 n 个块组成一个矢量 $X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$, 其中 $x_k (k=1, 2, \dots, n)$ 表示待分类的块, 每个待分类的块具有 4 个特征分量 $C = [m_j, \sigma_l, T_x, T_y]$, 分别表示为 $[x_{i1}, x_{i2}, x_{i3}, x_{i4}]$ 。用 r_{ij} 表示 X 中块 x_i 和块 x_j 相似的程度, 有 $0 \leq r_{ij} \leq 1 (i, j=1, 2, \dots, n)$ 。

若 $r_{ij} = 0$, 表示块 x_i 与块 x_j 截然不同, 毫无相似之处;

若 $r_{ij} = 1$, 表示块 x_i 与块 x_j 完全相似(或等同)。当 $i = j$ 时, 则是 x_i 自己与自己相似的程度, 恒取 1, 从而确定了域 X 上的一个相似关系, 其对应的矩阵为

$$R = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \dots & r_{1n} \\ r_{21} & r_{22} & \dots & r_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ r_{n1} & r_{n2} & \dots & r_{nn} \end{bmatrix} \quad (2)$$

其中 $r_{ij} = R(x_i, x_j)$ 为被分类块之间的相似程度的统计量。

对相似块进行聚类的方法有多种^[12], 比如基于等价关系的方法、基于最大生成树的方法和基于最优生成树聚类的方法, 它们都是以相似矩阵 R 为基础的方法。基于等价关系方法和基于最大生成树的方法效果是等价的, 后者对有的应用可能效果会好一些, 但要通过迭代的方法计算最大生成树或最小二分割, 要比计算等价模糊矩阵的复杂度高, 所以我们选择等价矩阵的聚类方法。

用等价矩阵方法对样本进行聚类, 其效果的好坏关键在于合适地选择统计函数, 要求其分辨力强和计算复杂性低, 由于在使用“指数相似系数公式”计算出来的相似关系就是用等价矩阵方法或最大生成树方法进行聚类, 其失真性与最优生成树相比也很接近^[12], 所以, 这里选择指数相似公式作为相似度的计算公式。

如果特征分量 $x_{ik}, x_{jk} \in [0, 1] (k=1, 2, \dots, m)$, 则待模糊聚类的向量 x_i, x_j 为 $x_i = (x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{im})$, $x_j = (x_{j1}, x_{j2}, \dots, x_{jm})$ 。

于是定义指数相似系数公式为

$$r_{ij} = \frac{1}{m} \sum_{k=1}^m \exp \left(-\frac{3(x_{ik} - x_{jk})^2}{4 S_k^2} \right), \quad i, j = 1, 2, \dots, n \quad (3)$$

其中

$$S_k = \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_{ik} - \bar{x})^2 \right]^{\frac{1}{2}}, \quad k = 1, 2, \dots, m$$

$$\bar{x}_k = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_{ik}, \quad k = 1, 2, \dots, m$$

经过上述方法处理的模糊关系矩阵是满足自反性和对称性的, 但不满足传递性, 故 R 只是相似矩阵, 还要把它改造成等价矩阵, 其方法是: 先将 R 自乘: $RR = R^2$; 再将 R^2 自乘: $R^2 R^2 = R^4$; 然后依次求出 R^8, R^{16}, \dots 直至出现如下关系:

$R^{2^k} = R^{4^k} R^{2^k}$, (其中的相乘为模糊乘积^[12]), 则 R^{2^k} 就是一个等价关系(或矩阵)。当确定了模糊等价矩阵后, 则可

进行最佳相似匹配块的选择。这里假设在做相似等价矩阵计算时, 参考帧的搜索窗口内某一 $N \times N$ 的块为第一个, 则我们用如下函数作为最后的匹配等价函数: $J = r_{11} + r_{12} + \dots$, 选择使 $J_{\text{out}} = \min\{J\}$ 的参考帧的块作为最佳匹配块, 来替代当前丢失的块。

2.2 用网格变形的方法降低块效应

前面所述的聚类方法虽然对平移运动的丢失块恢复能得到很好的匹配结果, 但是在丢失块运动为非平移运动如旋转、缩放和变形等一些运动方式时, 基于匹配块运动的补偿方法将产生块效应, 这种块效应可用多种方法来降低, 如各种滤波的方法, 但 these 方法主要是对块的边界进行滤波, 会使得边界模糊, 所以在这里使用一种基于网格变形的仿射变换方法来降低非平移运动造成的块效应^[9]。在用模糊聚类方法恢复丢失的块后, 用一个控制网格覆盖到该宏块(16×16), 它在周围边界上共有 12 个控制点, 在内部有 4 个控制点, 相邻两个控制点之间的水平或垂直距离为 5 个像素点, 即假设一个宏块左上角的坐标为(0,0), 则 16 个控制点的坐标分别为: (0, 0), (5, 0), (10, 0), (15, 0), (0, 5), (5, 5), (10, 5), (15, 5), (0, 10), (5, 10), (10, 10), (15, 10), (0, 15), (5, 15), (10, 15), (15, 15)。其中第一维为水平坐标, 第二维为垂直坐标, 如图 3 所示(图中控制点之间的像素未画出)。

控制网格确定后, 对恢复后的块进行变形, 以适应当前恢复块周围的信息。它首先估计出控制节点的运动信息, 丢失节点的信息是通过在控制节点选择 1 个像素矢量, 与丢失块周围相邻块的内边界上的像素矢量进行匹配, 选择 MSE(或 MAD)最小的点为控制节点的匹配点, 最后得到其位移矢量。如图 4 所示。匹配代价函数公式为式(4):

$$dx_i^C : D(dx_i^C) = \min_{|d_s| \leq W_s} D(d_s) \quad (4)$$

其中 $D(d_s) = \sum_{k=L_v}^{L_v} (f_{x_i+k, y_i} - f_{x_i+k+d_s, y_i-1})^2$; $f_{x,y}$ 为位于 (x, y) 点的像素值; (x_i, y_i) 为控制点 C_i 的坐标; 如果 $D(dx_i^C) < D(0) + T_m$ 时, 该点就不移动, 否则, 它就移动距离为 $(dx_i^C, 0)$, T_m 为一门限值, 用来屏蔽噪声; L_v 和 W_s 分别为匹配矢量的长度和搜索范围, 如果其值大, 会提高匹配精度, 但会增加计算量, 在实验时, 我们取值分别为 5 和 4。

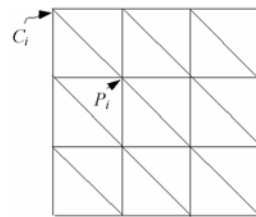


图 3 16×16 块上的网格控制点
Fig.3 Control pixel in 16×16 block

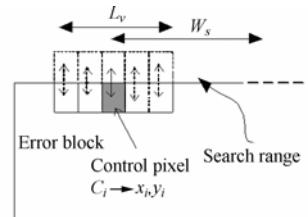


图 4 控制节点位移搜索
Fig.4 Search the translation of control pixel

另外，内部控制点的位置，由周围控制点插值得到，如式(5)所示：

$$dx_i^P = \frac{1}{\sum_k D_{i,k}^{-1}} \sum_{k=1}^n \frac{dx_k^C}{D_{i,k}}, \quad dy_i^P = \frac{1}{\sum_k D_{i,k}^{-1}} \sum_{k=1}^n \frac{dy_k^C}{D_{i,k}} \quad (5)$$

其中 $D_{i,k}$ 是内部控制点 P_i 与外部控制点 C_k 的距离。 n 是内插时用到的控制点的个数。

在得到控制点的位移后，进行仿射变换如图 5 所示。其中 (x^d, y^d) 为变换输入点的坐标， (s, t) 为变换到中间结果的坐标， (x^o, y^o) 为最后仿射变换输出点的坐标。仿射变换由两个步骤构成，先把一个不规则的三角形变换成一个规则三角形，然后再变换到不规则三角形，公式为式(6)–式(9)。

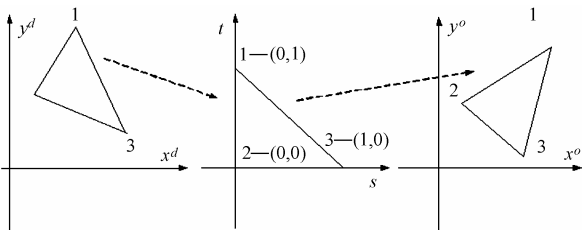


图 5 仿射变换 ($D \rightarrow O$) 图
Fig.5 Affine transform ($D \rightarrow O$)

$$w(s, t) = \begin{cases} x = a_1 + a_2s + a_3t \\ y = b_1 + b_2s + b_3t \end{cases} \quad (6)$$

其中的 6 个参数由目标控制节点 $(x_i, y_i, i=1,2,3)$ 决定：

$$\left. \begin{aligned} a_1 &= x_3, & b_1 &= y_3 \\ a_2 &= x_1 - x_3, & b_2 &= y_1 - y_3 \\ a_3 &= x_2 - x_3, & b_3 &= y_2 - y_3 \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

则反向映射为

$$w^{-1}(x, y) = \begin{cases} s = \frac{1}{J} [(x_2y_3 - x_3y_2) + (y_2 - y_3)x + (x_3 - x_2)y] \\ t = \frac{1}{J} [(x_3y_1 - x_1y_3) + (y_3 - y_1)x + (x_1 - x_2)y] \end{cases} \quad (8)$$

其中 $J = x_1y_2 + x_2y_3 + x_3y_1 - y_1x_2 - y_2x_3 - y_3x_1$ 。

最终的变换为

$$(x^o, y^o) = w(w^{-1}(x^d, y^d)) \quad (9)$$

2.3 自适应方法

由于基于网格的变形法需要的计算复杂度较高，在当只有平移运动时，就不需要网格变形法，只用模糊聚类块匹配法就能达到很好的效果。因此可根据差错块的周围块的运动矢量的情况来自适应判断该区域是否为平滑区域。具体为：

先计算周围块运动矢量的平均值 \bar{v} ；

$$\bar{v} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |v_i| \quad (10)$$

其中 n 是丢失块周围相邻块的个数； v_i 是第 i 个块的运动矢量。

然后计算每个块运动矢量与平均值差值的绝对值，计算这些绝对值的和 T_a ：

$$T_a = \sum_{i=1}^n ||v_i| - \bar{v}| \quad (11)$$

当 T_a 大于给定的门限值 T_v 时，就用基于网格的仿射变换方法去除块效应，否则，只用模糊聚类的块匹配方法掩盖丢失的块。其中门限值根据 \bar{v} 值进行自适应地调整，取为 $0.1\bar{v}$ 。

3 实验结果

我们用几个测试序列对文中的所提出的方法，在 h.264 参考软件 jm17 做了实验，量化参数 QP 选为 16，共编解码 30 帧，第 1 帧为 I 帧，其余编码为 P 帧，网络的模拟丢包用 MobileIP，它是一个模拟 3GPP/3GPP2 空中接口协议的软件，它能根据不同的误码样本文件来模拟实际 3G 信道传输 IP 包的情况，其具体的使用方法见文献[13]，对视频码流进行 RTP 打包的方法见文献[14]。对网格变形的一些门限参数选择如表 1 所示：

表 1 试验参数选择
Tab.1 Parameter selection

参数名称	意义	数值
L_v	控制节点匹配矢量的大小	5
W_s	控制节点搜索范围	4
T_m	匹配误差门限	400

实验结果与文献[10]中的 MV 最大平滑法(亦即参考软件中的方法)、单纯的基于 MAD 的块匹配(BMA)方法和文献[9]中的块匹配网格变形 (BMA-MBW) 联合法进行了比较。图 6 是 mobile 的 CIF 图像在 QP=16，丢包率为 6.54% 差错掩盖效果图；图 7 为 claire 的 CIF 图像效果图。对 Mobile 进行的各种方法的主观比较如图 8 所示。从图中可以看出，其主观效果基本上与 PSNR 反映的一致。

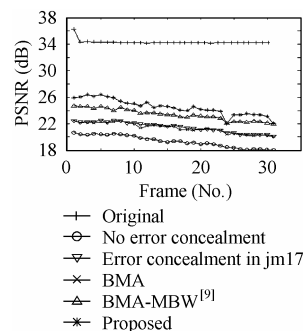


图 6 Mobile.cif 在 QP=16，丢包率为 6.54% 时的差错掩盖
Fig.6 Error concealment of mobile.cif (QP=16, package drop ratio is 6.54%)

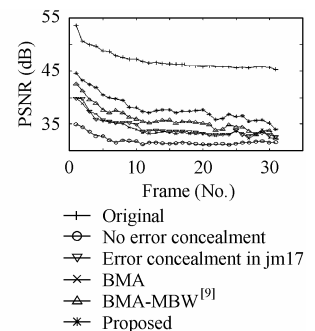


图 7 Claire.cif 在 QP=16，丢包率为 5.5% 时的差错掩盖
Fig.7 Error concealment of claire.cif (QP=16, package drop ratio is 5.5%)

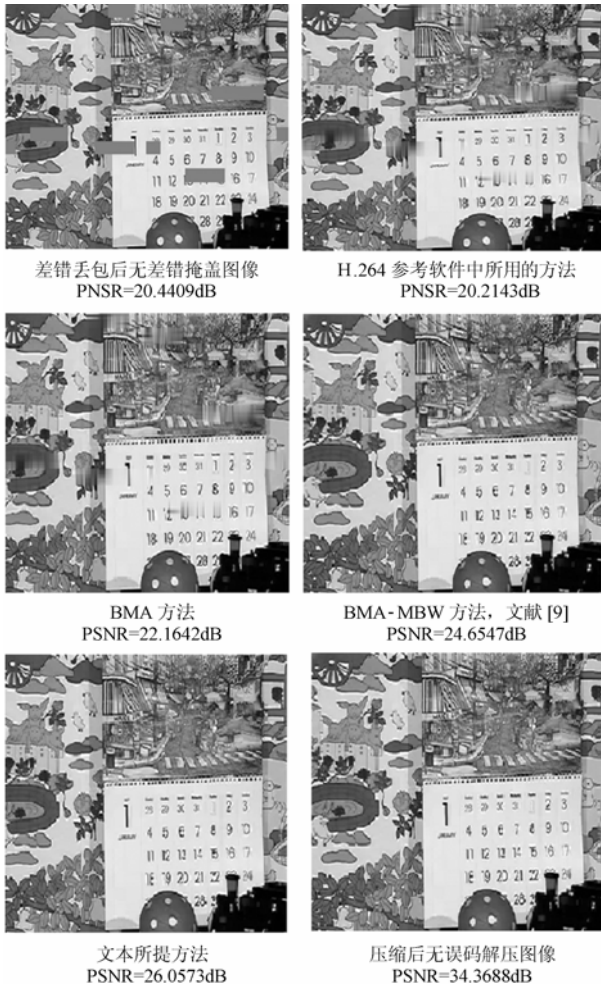


图8 测试序列 Mobile.cif 在丢包率为6.54%,QP=16时的掩盖效果图
Fig.8 Mobile.cif error concealment(Package drop ratio is 6.54%,QP=16)
在试验中用的 PSNR 公式为

$$PSNR = 10 \log \left(\frac{I \cdot J \cdot 255^2}{\sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J |f(i, j) - \hat{f}(i, j)|^2} \right) \quad (12)$$

从以上两个测试序列的测试情况来看,由于 mobile 视频信号的细节和运动比较丰富,所以其解码后的总体 PSNR 比较低。本文提出的方法不管是在细节和运动比较丰富的测试序列,还是在细节比较少和运动不复杂的序列,其 PSNR 都比文献[9]有所提高约 1.5dB,比 h.264 参考软件 jm17 中提供的差错复原方法平均提高约 3.5dB。

4 结束语

本文提出了一种基于模糊聚类和网格变形的自适应差错掩盖方法,它首先利用帧内相邻块的平滑约束条件和帧间相邻块的统计信息进行模糊最佳块匹配。这种方法在平移运动的场合比传统的块匹配方法能取得较好的效果,在有旋转、变形和缩放等运动的场景用网格变形的的方法对第一步得到的模糊聚类匹配块进行改进,由于基于网格变形的的方法使得计算复杂度提高,所以在采用自适应的方法检测丢失块的场

景中是否有复杂运动还是只有平移运动,如果只有平移运动,就只采用基于模糊聚类的块匹配方法;如果有复杂运动,则分两步进行差错掩盖。这样能既能减少计算复杂度,又能取得较好的效果。经过实验测试,不论是在细节丰富和运动复杂的场合还是在细节较少和运动不复杂的场合,其 PSNR 都比文献[9]中提出的 BMA-MBW 方法平均提高大约 1.5dB,比传统的基于块匹配的方法平均提高约 3.5dB。

参考文献

- [1] Haskell P, Messerschmitt D. Resynchronization of motion compensated video affected by ATM cell loss. in Proc. ICASSP, San Francisco, CA, Mar. 1992: III545-548.
- [2] Al-Mualla M E, Canagarajah C N, Bull D R. Motion field interpolation for temporal error concealment. Proc. Inst. Elect. Eng. Vis. Image Signal Process, Oct. 2000, 147: 445-453.
- [3] Lam W M, Reibman A R, Liu B. Recovery of lost or erroneously received motion vectors. in Proc. ICASSP, Minneapolis, MN, Apr. 1993 : V417-V420.
- [4] Chen M J, Chen L G, Weng R M, Error concealment of lost motion vectors with overlapped motion compensation. *IEEE Trans. on Circuits Syst. Video Technol.*, 1997, 7: 560-563.
- [5] Wang Y, Zhu Q F, Shaw L. Maximally smooth image recovery in transform coding. *IEEE Trans. on Commun.*, 1993, 41: 1544-1551.
- [6] Shirani S, Kossentini F, Ward R. Reconstruction of baseline JPEG coded images in error prone environments. *IEEE Trans. on Image Processing*, 2000, 9: 1292-1299.
- [7] Alkachouh Z, Bellanger M G. Fast DCT-based spatial domain interpolation of blocks in images. *IEEE Trans. on Image Processing*, 2000, 9 : 729-732.
- [8] Sun H, Kwok W. Concealment of damaged blocks transform coded images using projections onto convex sets. *IEEE Trans. on Image Processing*, 1995, 4 : 470-477.
- [9] Atzori Luigi, Francesco G B, Natale De, Cristina Perra. A spatio-temporal concealment techniques using boundary matching algorithm and mesh-based warping(BMA-MBW). *IEEE Trans. on Multimedia*, 2001, 3: 326-338.
- [10] Ye-Kui Wang, Hannuksela M, Varsa V, Hourunranta A, Gabbouj M. The error concealment feature in the H.26L test model, Image Processing. 2002. Proceedings. 2002 International Conference, 22-25 Sept., 2002, Vol.2 : 729-732.
- [11] Sun H, Kwok W. Concealment of damaged block transform coded images using projections onto convex sets. *IEEE Trans. on Image Processing*, 1995, 4 : 470-477.
- [12] 彭祖赠, 孙毓玉. 模糊(Fuzzy)数学及其应用. 武汉: 武汉大学出版社, 2002, 3: 87-92.
- [13] Viktor Varsa, Marta Karczewicz. Common Test Conditions for RTP/IP over 3GPP/3GPP2. VCEG - N80, 2001-12.
- [14] Schulzrinne H, Casner S, Frederick R, Jacobson V. RTP:A Transport Protocol for Real Time Applications. RFC3550, July 2003.

郭秀江: 男, 1971 年生, 博士生, 研究方向为图像处理与多媒体通信。
朱秀昌: 男, 1947 年生, 教授, 博士生导师, 研究方向为图像处理与多媒体通信。