

基于非抽样小波字典的低速率视频编码*

廖斌[†], 许刚, 王裕国

(中国科学院 软件研究所, 北京 100080)

Low Bit-Rate Video Coding Based on Undecimated Wavelet Dictionary

LIAO Bin[†], XU Gang, WANG Yu-Guo

(Institute of Software, The Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China)

+ Corresponding author: E-mail: pliaobin@sina.com

Received 2002-11-22; Accepted 2003-04-17

Liao B, Xu G, Wang YG. Low bit-rate video coding based on undecimated wavelet dictionary. *Journal of Software*, 2004,15(2):221~228.

<http://www.jos.org.cn/1000-9825/15/221.htm>

Abstract: Currently, the core techniques of most video coders are based on blocked DCT (discreted cosine transform) transform. At very low bit-rates, video coders of this class always produce visual-sensible block artifacts. Recently, the video coders based on matching pursuit have been proved to have super coding efficiency, compared with the H.263 standard. However, the computation complexity is much too higher, because of laboriously searching optimal atoms in a redundant dictionary. A video coding algorithm based on undecimated wavelet dictionary is proposed, which incorporates multiresolution characteristics of the wavelet transform and assort to filter the scheme between dictionary functions, to reduce the computation complexity of the original algorithm greatly. Considering the continuity of motion information in the neighboring frames, an entropy coding method of atom position based on a hybrid structure is given. The experimental results show that this algorithm keeps the original coding results and has the desirable application value.

Key words: video coding; matching pursuit; undecimated wavelet; wavelet packet

摘要: 目前,大多数视频编码器所采用的核心编码技术都是基于分块 DCT(discreted cosine transform)变换对帧预测误差进行编码,在极低编码速率下,这类编码器往往会产生人眼敏感的方块效应。而基于匹配跟踪冗余信号分解的视频编码器具有比 H.263 编码器更高的编码性能,但由于该算法需要在一个冗余字典里搜索最佳匹配误差结构的原子函数,其实现所需要的运算量比传统的编码器要高很多,因此影响了这种编码器的效率。提出了基于树形结构的非抽样小波字典的匹配跟踪算法,能够充分利用字典函数之间存在的滤波结构关系,使得整个算法实现的计算量显著下降。同时,考虑到相邻帧运动信息的连续性,最后还给出一种基于晶格结构的有效原子位置信息编码方法。实验结果表明,该算法保持了原有的编码性能,在视频编码应用中具有很好的实用价值。

关键词: 视频编码;匹配跟踪;非抽样小波;小波包

中图法分类号: TP391 **文献标识码:** A

* 作者简介: 廖斌(1974—),男,湖北武汉人,博士,主要研究领域为图像编码,多媒体技术;许刚(1963—),男,博士,副研究员,主要研究领域为视频图像处理,图像编码;王裕国(1941—),男,研究员,博士生导师,主要研究领域为计算机图形学,多媒体技术。

目前,针对低速率信道(10kb/s~60kb/s),如无线通道和电话线上的视频通信方面的应用需求越来越广泛.但是,已经制定的一些国际视频编码标准 H.261,H.263^[1],MPEG-1 和 MPEG-2 都不能满足在极低速率(低于 20kb/s)下的应用.一些研究成果^[2-4]表明,在低速率编码应用中,如果采用基于冗余字典的匹配跟踪信号分解算法^[5]取代基于正交分块 DCT(discreted cosine transform)变换对运动残余编码,能够获得更好的视觉效果.在基于匹配跟踪的视频编码器中,利用包含更多基函数的冗余字典对运动误差帧编码,显得非常灵活.随着目标速率的下降,这样的编码器能够更好地匹配运动残余,使得所产生的人眼敏感的失真比分块 DCT 编码器要小.

在匹配跟踪算法中存在一个迭代过程,它要求在每一次迭代中计算预测误差信号与字典中包含的所有函数的内积,然后根据内积的大小来确定最佳匹配的字典函数.文献[3]在关于字典选择的论述中指出:任何完备的二维函数的子集都可以作为字典,能量不变性保证了算法的收敛性;而一个最优的字典通常包含有限数目的波形,这些波形应该能够很好地匹配一般预测误差结构.由于帧间预测误差通常具有局部特性,因此要求字典函数也应该具有良好的空间局部特性.在 Neff 和 Zahor 给出的低速率匹配跟踪视频编码算法^[3]中,采用的是有限的可分离二维 Gabor 窗函数集合,但由于该字典函数在实现内积运算时缺乏有效的计算结构,使得整个视频编码算法实现所需要的运算量相当高.因此,如何探索和选择一个既具有较好编码性能,同时又能满足运算量要求的冗余字典,已经成为匹配跟踪视频编码应用领域的一个重要课题,这也是本文的主要研究目标.考虑到小波函数同样具有良好的局部特性,而且根据 S. Mallat 提出的多分辨率分析理论^[6],能够有效地计算小波系数,在此基础上,本文提出一种基于树形结构的非抽样小波字典的低速率视频编码算法.除了原子搜索效率以外,如何对搜索产生的最佳原子参数信息编码也是值得关注的.通过参考前一帧原子位置的分布信息,本文还给出了一种基于晶格结构的原子位置信息的有效编码方法.实验结果表明,本文提出的算法保持了原有的视频编码性能,这使得匹配跟踪算法在视频编码方面得到进一步扩充,同时满足视频编码实际应用的需求.

1 匹配跟踪运动残余编码

Neff 和 Zahor 提出的基于匹配跟踪的低速率视频编码器无论是从信噪比还是从恢复图像的主观视觉质量来看都超过了 H.263 标准,所选用的字典是由高斯函数通过伸缩、平移和频率调制得到的 Gabor 窗函数集合的子集.该算法将运动残余分解为从冗余字典中选取的一组最佳匹配残余的字典函数的线性组合,这样使得在低码率条件下能够选择最重要的信息进行编码.它包含一个迭代过程,在每一次迭代过程中,从字典中确定一个最佳表示残余信号能量的基函数.为了避免在整幅图像中搜索,他们作出如下合理假设:认为运动残余图像具有稀疏特征,即误差能量的分布是不均匀的,通常误差能量主要分布在那些运动预测不够精确的区域.这样,有理由优先选择这样的区域作为原子函数搜索的起点.为了确定这样的区域,首先将图像划分为 12×12 大小的重叠块,计算每个图像块的能量即像素值平方求和,然后将具有最大能量的图像块作为搜索起点.当确定了搜索函数的起点以后,在围绕该块中心位置的一个固定尺寸 16×16 的窗口区域范围内的每个像素位置 (x,y) ,计算图像块 f_i 字典函数 \tilde{g}_γ ($\gamma \in \Gamma$) 的内积 w_γ ,最后按照内积最大的原则选择一个字典函数 g_{γ_i} 作为最佳匹配原子函数,这里的索引 i 表示迭代过程的第 i 步.然后对残余图像进行更新: $\tilde{f}_{i+1} = \tilde{f}_i - Q(w_i)\tilde{g}_{(\gamma_i,x,y)}$,其中 $Q(\cdot)$ 表示量化操作.在经过 n 步迭代以后,原始图像就表达成为如下逼近形式: $\hat{f} = \sum_{i=1}^n Q(w_i)g_{(\gamma_i,x,y)}$.最后将系数和有关字典函数的描述参数编码输出.

2 非抽样小波字典构造

虽然 Neff 和 Zahor 提出的基于匹配跟踪的低速率视频编码器性能明显超过了 H.263 标准,但由于其选择的 Gabor 窗函数字典集合在执行原子搜索时缺乏有效的计算结构,从而增加了整个编码器实现的运算量.鉴于小波函数具有良好的局部特性,它所具有的内在结构允许构造大量具有不同时频特性的基函数,我们希望利用它来建立一个树状结构的具有快速计算特性的字典.考虑到字典冗余性的要求,我们选择非抽样小波来构造这样一个具有良好局部特性的冗余函数字典.非抽样小波(UDWT)属于冗余变换,又称作平移不变小波变换^[7]或稳定小波变换^[8].下面首先给出非抽样小波字典的构造过程,然后讨论小波基函数选取问题,最后给出原子搜索算法

的实现步骤.

2.1 滤波器构架

对于具有紧支支撑的小波,记尺度滤波器为 $\{h_l: l=0, \dots, L_h\}$,小波滤波器为 $\{g_l: l=0, \dots, L_g\}$,令 N 表示输入信号的长度, $L = \max(L_g, L_h) \leq N$,定义 $\tilde{h}_l = h_l/\sqrt{2}$, $\tilde{g}_l = g_l/\sqrt{2}$,其 Z 变换分别记为 $\tilde{H}(Z)$ 和 $\tilde{G}(Z)$.设输入信号采样序列 $\{X_t: t=0, \dots, N-1\}$ 为向量 X ,非抽样小波包分解过程如图 1 所示,在经过 j 层小波变换以后,得到第 j 层的小波系数集合 $\{W_{j,n}: 0 \leq n \leq 2^j - 1\}$,其中 $W_{j,n}$ 表示的是非抽样小波变换在第 j 层,频带索引为 n 的系数序列,值得注意的是,其数据长度依然为 N ,并未向下采样.

利用多分辨率小波分析中的双尺度差分方程关系,通过对上一层的小波包系数进行滤波,可以计算得到处于不同层次($j=1, \dots, J$)的小波包系数.记 $W_{0,0} = X$,在已知小波系数集合 $\{W_{j-1, \lfloor n/2 \rfloor, t}\}$ 的情况下,利用下式可以计算得到 $\{W_{j,n,t}\}$:

$$W_{j,n,t} = \sum_{l=0}^{L-1} \tilde{p}_{n,l} W_{j-1, \lfloor n/2 \rfloor, t-2^{j-1}l}, \quad t=0, \dots, N-1.$$

其中,

$$\tilde{p}_{n,l} = \begin{cases} \tilde{h}_l, & n \bmod 4 = 0 \text{ 或 } 3 \\ \tilde{g}_l, & n \bmod 4 = 1 \text{ 或 } 2 \end{cases}$$

假定

$$\{\tilde{f}_{1,0,l}\} = \{\tilde{h}_l: l=0, \dots, L-1\}, \text{ 且 } \{\tilde{f}_{1,1,l}\} = \{\tilde{g}_l: l=0, \dots, L-1\},$$

那么,对于一般的 (j,n) ,有

$$\tilde{f}_{j,n,l} = \sum_{k=0}^{L-1} \tilde{p}_{n,k} \tilde{f}_{j-1, \lfloor n/2 \rfloor, l-2^{j-1}k}, \quad l=0, \dots, L_j - 1,$$

其中 $L_j = (2^j - 1)(L - 1) + 1$ 为函数 $\{\tilde{f}_{j,n,l}\}$ 的长度.例如,当 $j=2$ 时,

$$\begin{aligned} \tilde{f}_{2,0,l} &= \sum_{k=0}^{L-1} \tilde{p}_{0,k} \tilde{f}_{1,0,l-2k} = \sum_{k=0}^{L-1} \tilde{h}_k \tilde{h}_{l-2k}, \\ \tilde{f}_{2,1,l} &= \sum_{k=0}^{L-1} \tilde{p}_{1,k} \tilde{f}_{1,0,l-2k} = \sum_{k=0}^{L-1} \tilde{g}_k \tilde{h}_{l-2k}, \\ \tilde{f}_{2,2,l} &= \sum_{k=0}^{L-1} \tilde{p}_{2,k} \tilde{f}_{1,1,l-2k} = \sum_{k=0}^{L-1} \tilde{g}_k \tilde{g}_{l-2k}, \\ \tilde{f}_{2,3,l} &= \sum_{k=0}^{L-1} \tilde{p}_{3,k} \tilde{f}_{1,1,l-2k} = \sum_{k=0}^{L-1} \tilde{h}_k \tilde{g}_{l-2k}, \end{aligned}$$

那么,当小波包分解到第 j 层时,小波包系数 $\{W_{j,n,t}\}$ 可以表示为输入信号 $\{X_t\}$ 经过如下滤波过程得到:

$$W_{j,n,t} = \sum_{l=0}^{L_j-1} \tilde{f}_{j,n,l} X_{t-l}, \quad t=0, \dots, N-1.$$

记函数 $\tilde{f}_{j,n}$ 的 Z 变换形式为 $\tilde{F}_{j,n}(Z)$,那么当 $j=2$ 时,就有 $\tilde{F}_{2,0}(Z) = \tilde{H}(Z)\tilde{H}(2Z)$, $\tilde{F}_{2,1}(Z) = \tilde{H}(Z)\tilde{G}(2Z)$, $\tilde{F}_{2,2}(Z) = \tilde{G}(Z)\tilde{G}(2Z)$ 以及 $\tilde{F}_{2,3}(Z) = \tilde{G}(Z)\tilde{H}(2Z)$.这样,所有处于小波包树结构中的节点对应的滤波器构成如下集合:

$$\left\{ \bigcup_n \tilde{F}_{j,n}, 0 \leq j \leq K, 0 \leq n \leq 2^j - 1 \right\},$$

称为非抽样小波包字典,其中 K 表示分解的层数,字典大小为 $2^{K+1} - 1$.

2.2 小波基函数选择

到目前为止,可用的小波种类非常多,但并不是所有的小波都适合构造非抽样小波字典以用于预测误差图

像的分解.有些小波滤波器光滑度较好,适合分解一般的自然图像,如 Antonni9-7 带滤波器,但是其支撑范围较长,构造得到的字典函数衰减比较慢,并不能较好地匹配预测误差图像的一般特征.考虑到局部特性的要求以及计算效率的原因,我们选择 Haar 小波,作 4 层小波包分解,在总共 31 个函数波形中,根据预测误差图像的特点,去掉那些具有较长支撑且高频震荡的波形,最后保留 13 个波形(如图 1 所示,其中标号所对应的滤波器),构成实际采用的字典,这些函数波形的形状与 R. Neff 和 A. Zakhor 所采用的 Gabor 字典函数具有相似之处,二者可分离的二维图形表示分别如图 2(a)和图 2(b)所示.相比之下,虽然 Haar 小波字典函数的空间局部性很好,但其光滑性却很差,为了避免在误差图像重构时出现方块效应,我们在解码器实现中将采用另外一组经过平滑的函数集合,这样就可以改善恢复图像的视觉效果.

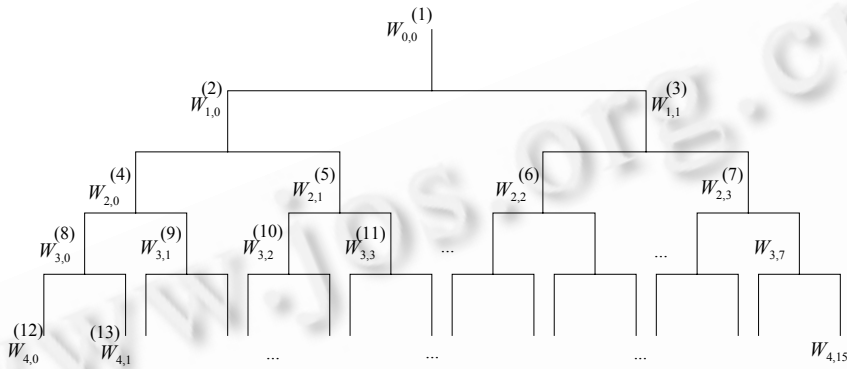
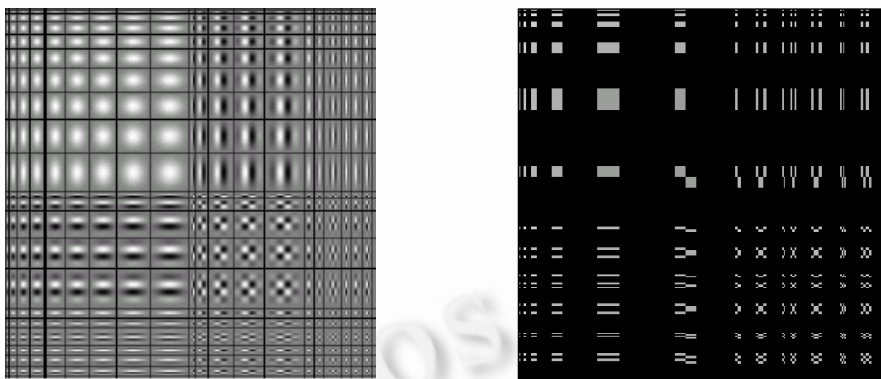


Fig.1 The representation of undecimated wavelet packets

图 1 非抽样小波包树结构表示



(a) Gabor dictionary

(a) Gabor 字典

(b) Undecimated Haar wavelet dictionary

(b) 非抽样 Haar 小波字典

Fig.2 The graph of two dimension redundant dictionary

图 2 二维冗余字典图形表示

2.3 原子搜索算法实现步骤

这里,我们给出基于非抽样小波字典的时频原子搜索算法.当确定了搜索范围,即 $S \times S$ 大小的图像块以后,需要将它与每个字典函数求取内积运算,将内积最大的时频原子作为本次搜索的结果.在这个算法中,由于采用可分离二维滤波器,因此包含水平滤波和垂直滤波两个过程.

1. 水平滤波过程:采用非抽样小波包中的字典函数对尺寸为 $S \times S$ 的图像块进行水平滤波.需要说明的是,为了满足后面垂直滤波过程计算的需要,实际上要对 $S+15$ 行数据进行滤波(详细解释见下一节的分析).其计算过程可以利用小波包分解自上而下的顺序完成,设初始图像块表示为 C_1 ,首先分别用 $\tilde{H}(Z)$ 和 $\tilde{G}(Z)$ 进行滤波,得到两个同样大小的系数块 C_2 和 C_3 ,在此基础上,然后分别采用 $\tilde{H}(2Z)$ 和 $\tilde{G}(2Z)$ 再进行滤波,如此过程继续下去,

根据选定的字典函数,最终将得到 13 个尺寸为 $S \times (S+15)$ 的系数块.

2. 垂直滤波过程.其实现过程与水平滤波基本相同,对每个系数块 $C_i (1 \leq i \leq 13)$ 进行垂直滤波,那么最终会得到 $13 \times 13 = 169$ 个尺寸为 $S \times S$ 的系数块.

3. 在这 169 个 $S \times S$ 大小的系数块中,寻找系数幅值最大的系数作为最终的搜索结果,记录其水平和垂直字典函数索引 h 和 v 以及空间位置 (x,y) .

3 运算量分析和比较

采用二维 Gabor 字典函数,利用其字典结构可分离的特性分别对图像行和列进行滤波操作,能够降低求取内积所需运算量.文献[3]中给出了搜索一个时频原子所需要的乘法运算次数为

$$N = \sum_{v=0}^{B-1} \left(L_v S(S + L_{\max}) + S^2 \sum_{h=0}^{B-1} L_h \right),$$

其中, $S=16$ 表示搜索窗口的大小, $B=20$ 表示一维 Gabor 字典的尺寸, h 和 v 分别表示二维 Gabor 函数的水平和垂直滤波器的索引, L 则表示滤波器的长度 ($L_{\max} = 35, 1 \leq L_h, L_v \leq 35$). 经过计算可以得到,搜索一个原子需要 1 733 312 次乘法和相同数目的加法运算.

对于本文给出的非抽样的小波包字典,令 S 表示搜索窗口的大小,那么,对于每个字典函数都需要计算 $S \times S$ 次内积运算.令 L_h 和 L_g 分别表示尺度和小波滤波器的长度,而 $L = \max(L_h, L_g)$. 这样,为了计算小波包树中第 j 层的 S 个系数,就需要预先知道第 i 层中 $S + \sum_{k=i}^{j-1} [2^k(L-1)] (i < j)$ 个系数.这表明,如果将小波包分解到第 4 层,就需要知道第 1 层的 $S+15(L-1)$ 个输入数据.为了计算树中任何节点的一个采样值,需要 L 次乘法和 $L-1$ 次加法运算.利用字典函数可分离的特性,首先对图像块进行水平滤波,所需要的计算量为

$$N_{hor} = [S + 15(L-1)] \sum_{n=2}^{13} (2L_n - 1) S_n,$$

其中 S_n 表示与第 n 个字典函数求取内积时所需要计算的样点数目, L_n 表示对应字典函数的长度.在进行垂直滤波之前,需要计算 $S+15(L-1)$ 行的水平滤波.将该式后面一项展开可以得到:

$$\sum_{n=2}^{13} (2L_n - 1) S_n = (6S + 54)(2L_h + 2L_g - 2).$$

经过水平滤波以后,得到 13 个尺寸为 $[S + 15(L-1)] \times S$ 的系数块,然后再进行垂直滤波,所需要的运算量为

$$N_{ver} = 13S \sum_{n=2}^{13} (2L_n - 1) S_n,$$

那么,搜索一个时频原子所需要的计算量为

$$N = N_{hor} + N_{ver} = [S + 15(L-1)] \sum_{n=2}^{13} (2L_n - 1) S_n + 13S \sum_{n=2}^{13} (2L_n - 1) S_n.$$

当选择 Haar 小波时 ($L_h=L_g=2$),求取一次内积只需要一次加法或减法运算,再加上正则化 ($1/\sqrt{2}$) 所需要的一次乘法运算,那么,搜索一个原子总共需要 71 700 次加法和相同数目的乘法运算.与 Gabor 字典相比,运算量降低为原来的 4% 左右,由于搜索原子的运算量在整个匹配跟踪算法中占主导地位,因此,运算量的降低对于提高整个视频编码算法的性能有着重要意义.

4 原子位置信息编码

利用匹配跟踪算法对预测误差图像进行编码以后,将会得到一组最佳匹配原子函数集合.如何对这些原子函数的位置描述信息进行有效的编码,也是一个值得探讨的问题.文献[4]中给出了一种基于单帧的霍夫曼编码方案.考虑到视频图像帧运动信息具有连续性,我们可以参考前一帧搜索到的原子位置分布信息所提供的先验

知识,提高对当前原子位置信息的熵编码效率.也就是说,当前帧搜索到原子函数的位置很可能位于上次搜索结果区域附近.从信息论的角度分析,令 P 表示第 t 帧中关于原子位置信息描述的随机变量,那么 $H(P_t) > H(P_t | MV_{t-1}, P_{t-1})$,其中 MV 表示运动向量信息, $H(\cdot)$ 为信息熵函数.为了充分利用前一帧的相关信息,我们将有关原子位置描述按照 8×8 的晶格结构分解为 3 部分:(a) 晶格中是否包含原子;(b) 晶格中包含原子的数目;(c) 非空晶格中各原子函数的位置.对于每个晶格而言,根据前一帧的对应块是否包含原子以及当前块是否为经过平移的运动补偿块,将晶格划分为 3 种状态,并利用可变长算术编码对这些信息编码.对于那些包含原子的晶格,需要对各原子的位置信息编码,我们将按照一定的顺序对这些位置进行扫描,产生一个二进制序列,对于那些出现原子的位置输出符号“1”,没有原子则输出符号“0”,当累计原子的个数达到该晶格所包含原子数目时就可以停止扫描(原子数目信息已经得到),最后利用游程编码对二进制序列编码.

5 实验结果分析

为了验证本文的算法,我们对视频序列 Missa of America(QCIF 格式,150 帧)和 Hall Monitor(QCIF 格式,300 帧)分别在极低速率 10kbps 和 24kbps 下进行编码.这两个序列都具有一定的代表性,前者包含比较少的运动部分,主要针对视频会议一类的应用;后者则包含相对较多的运动成分,常应用于远程监控.由图 3(e)~(h)的信噪比曲线分析可知,匹配跟踪视频编码算法的编码质量要明显好于 H.263 编码器,特别是在对运动剧烈的图像序列编码时,整体信噪比平均提高了 0.2~1.5dB.而采用非抽样 Haar 小波字典的编码结果与 Gabor 字典^[3]具有可比性,其优势在于复杂度的明显降低.

现在具体分析如图 3(h)所示的信噪比曲线变化情况,原始图像的采样速率为 10fps,目标速率为 24kbps.H.263^[1], Gabor+MP^[3]和本文的 UDWPT+MP 这 3 种编码算法的平均信噪比分别为 31.76dB,33.19dB 和 33.14dB.从第 0 帧到第 25 帧,由于图像序列中几乎没有运动物体,在这种情况下,3 种编码算法的性能差别不大.但是,从第 25 帧以后,场景中出现了两三个运动人体,同时存在从无到有的运动部分,这使得相邻图像帧之间出现了较大的运动残余,3 种压缩算法的编码性能在此阶段的差别十分明显.H.263 编码器的信噪比下降得很快,而后两种的编码结果则较为理想.图 3(b)~(d)分别给出了 3 种算法在 7.5fps/10bps 条件下第 160 帧恢复图像的对比情况,从恢复图像的视觉质量上比较,本文的编码算法保持了原有匹配跟踪算法的编码性能,运动部分比较清楚,没有明显的方块效应,而且失真较小,虽然从信噪比对比上略有降低,但从恢复图像的视觉感受上并没有太大差别.

6 结论

基于匹配跟踪的低速率视频编码算法通过对预测误差帧进行冗余扩展,提供了一种稀疏的表示方法,使得误差能量集中到少部分系数上,有效地提高了对运动估计不精确的区域进行编码的效率,无论是在信噪比上还是主观恢复视觉质量上,与 H.263 编码器相比都获得了明显改善.但是,时频原子的搜索效率直接影响到整个视频编码器的性能.本文通过建立树形结构的非抽样 Haar 小波字典替代原有的 Gabor 字典,利用小波变换计算的分级滤波结构实现内积运算,极大地降低了算法实现的复杂度.考虑到图像帧运动信息的连续性,我们最后还给出了一种基于晶格的原子位置信息编码方法,它在参考前一帧原子分布信息的基础上,提高了对当前帧原子位置信息的编码效率.实验结果表明,本文提出的算法保持了原有算法的编码性能,这使得匹配跟踪算法思想在视频编码方面的实时应用成为可能.



(a) Hallmonitor, original image (160)
(a) Hallmonitor,原始图像(160)



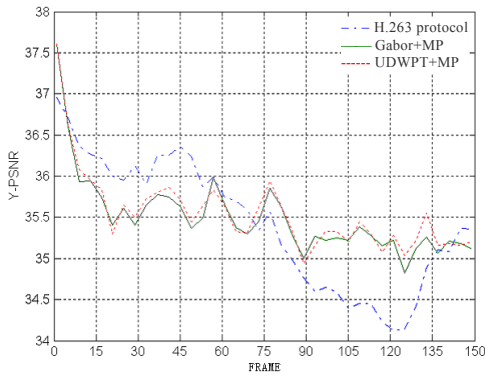
(b) Reconstructed image (H.263)
(b) 恢复帧(H.263)



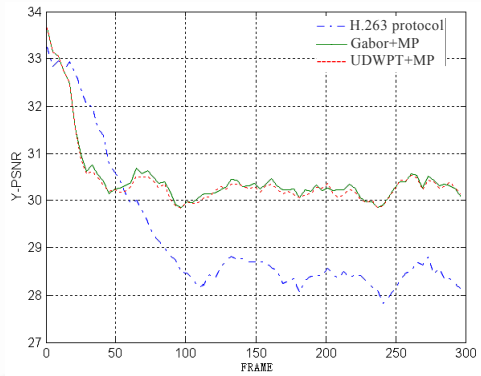
(c) Reconstructed image (Gabor+MP)
(c) 恢复帧(Gabor+MP)



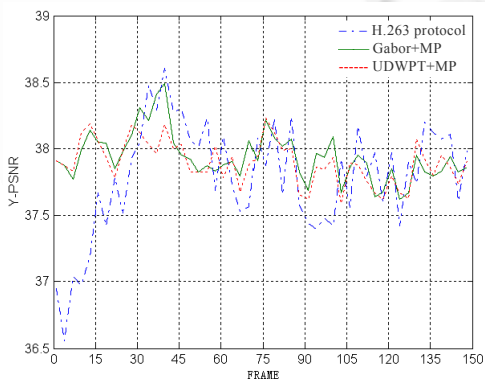
(d) Reconstructed image (UDWPT+MP)
(d) 恢复帧(UDWPT+MP)



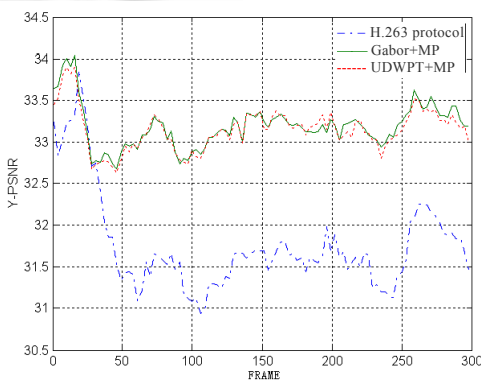
(e) Miss, 7.5fps/10kbps



(f) Hallmonitor, 7.5fps/10kbps



(g) Miss, 10fps/24kbps



(h) Hallmonitor, 10fps/24kbps

Fig.3 The comparison of experiment results between matching pursuit and H.263 video coder
图3 匹配跟踪(MP)与 H.263 视频编码算法实验结果对比

References:

- [1] Video Coding for Low Bit Rate Communication. ITU-T Recommendation H.263, 1998.
- [2] Vetterli M, Kalker T. Matching pursuit for compression and application to motion compensated video coding. In: Proc. of the Int'l Conf. on Image Processing. 1994. 725~729.
- [3] Neff R, Zakhor A. Very low bit rate video coding based on matching pursuits. IEEE Trans. on Circuits and Systems for Video Technology, 1997,7(1):158~171.
- [4] Al-Shaykh OK, Miloslavsky E, Nomura T, Neff R, Zakhor A. Video compression using matching pursuits. IEEE Trans. on Circuits and Systems for Video Technology, 1999,9(1):123~143.
- [5] Mallat S, Zhang Z. Matching pursuits with time-frequency dictionaries. IEEE Trans. on Signal Proc., 1993,41(12): 3397~3415.
- [6] Mallat S. A theory for multiresolution signal decomposition: The wavelet representation. IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1989,11(7):674~693.
- [7] Cohen I, Raz S, Malah D. Shift invariant wavelet packet bases. In: Proc. of the 20th IEEE Int'l Conf. on Acoustics, Speech and Signal Processing. Detroit, 1995. 1081~1084.
- [8] Nason GP, Silverman BW. The stationary wavelet transform and some statistical applications. Lecture Notes in Statistics: Wavelets and Statistics, 1995,103:281~299.

2004 年全国软件与应用学术会议(NASAC 2004)

征 文 通 知

2004 年全国软件与应用学术会议(NASAC 2004)由中国计算机学会软件工程专业委员会主办,将于 2004 年 10 月 15 日~17 日在北京召开。届时将进行软件工程等方面的技术与应用交流,会议将出版正式论文集,并将优秀论文推荐到核心学术刊物(EI 检索源)发表。欢迎大家踊跃投稿。

与此同时,为进一步增进学术界与企业界的交流与互动,届时将举办 2004 年中国软件技术与产业互动、计算机软件与应用教育等专题研讨会,热忱欢迎学术界、教育界和企业界的专业人士共同参与承办,共同就软件技术成果的转化与应用、软件产业发展与挑战、软件标准制定与推广应用、软件人才培养与教材出版等热门话题进行深入探讨和交流。在研讨会期间,参会单位可以举办成果和产品的展示与介绍活动。欢迎企业和研发机构踊跃报名。

一. 征文范围(包括但不限于)

| | | |
|------------------|------------|------------|
| 需求工程 | 质量度量与质量管理 | 软件语言 |
| 基于构件的软件开发 | 软件测试、检验与验证 | 软件标准与规范 |
| 面向对象技术 | 软件再工程 | 软件工程实践 |
| 软件体系结构、设计模式与软件复用 | 工具与环境 | 软件工程教育应用软件 |
| 软件过程管理与改进 | 操作系统与中间件 | 应用软件 |

二. 论文要求

1. 论文未曾在其他杂志、会议上发表或录用;
2. 论文长度: 每篇限定在 6 页(A4)以内;
3. 请以 PDF 或者 PS 格式提交论文。有关文章的版心、字号、题目、各级标题、格式及参考文献格式与《软件学报》相同。

三. 重要日期

1. 文稿截止日期: 2004 年 6 月 20 日
2. 论文录用通知日期: 2004 年 7 月 31 日
3. 专题研讨会报名截止日期: 2004 年 9 月 10 日

四. 联系方式

联系单位: (100083) 北京航空航天大学 软件工程研究所

联系人: 刘超 金梅 刘平

E-mail: nasac2004@sei.buaa.edu.cn

网址: <http://sei.buaa.edu.cn/nasac2004/>