

扫描格式转换的自适应帧频提升算法 及其 FPGA 实现

吴 勇, 张光烈, 郑南宁, 张 霞

(西安交通大学 人工智能与机器人研究所, 西安 710049)

[摘要] 文章提出了一种新的自适应帧频提升算法, 并深入研究了它的快速硬件实现方法。该算法通过引入内部参数和加权块匹配误差, 来进行自适应运动补偿, 因而它可以有效地消除噪声的影响, 并便于硬件实现。最后, 通过建立对应于可变参数的因子查找表和采用现场可编程逻辑器件 (FPGA) 快速实现了扫描格式转换中的帧频提升算法, 并应用在实际系统中, 实验结果表明该算法十分有效。

[关键词] 扫描格式转换; 帧频提升; 块匹配; 运动补偿

1 引言

随着高清晰度电视 (HDTV)、可视电话、因特网等数字视频的出现和发展, 扫描格式转换已成为相关领域的核心技术之一。而帧频提升技术则是扫描格式转换中上行转换的关键。该技术的计算复杂度大, 用硬件实现固定频率的帧频提升已很不容易, 实现任意频率的帧频提升就更加困难。另外, 由于帧频提升常产生非自然信号及噪声, 传统的运动补偿插补方法已不太适合, 需要寻找一种更高效的运动补偿插补方法。本文根据近年来在扫描格式转换方面的探索, 提出了一种新的帧频提升自适应插补算法。该算法通过引入可调内部参数, 较好解决了帧频任意提升问题; 而加权块匹配误差的引入, 可消除噪声, 提高运动补偿的有效性。在算法研究的基础上, 通过设计查找表, 采用 FPGA 进行了快速实现, 并在自主开发的可接收现行模拟制式节目的数字化逐行电视接收样机中得到实际应用。

2 算法的提出、原理及关键问题

为使信号的传输频带降低, 现行的模拟广播电

视系统采用的是隔行扫描方式。隔行显示也使得技术实现变得容易。然而, 随着电视机显示屏幕的增大, 亮度的提高, 隔行信号所产生的行间闪烁和屏幕大面积闪烁现象变得十分明显, 导致了电视图像的质量下降, 并会引起人的视觉疲倦。将隔行电视信号进行插补处理, 形成逐行扫描的电视信号, 可以有有效的抑制和消除传统电视的行间闪烁、场闪烁和爬行现象。此外, 人类视觉系统对大面积闪烁比对闪烁的细节更敏感^[1]。因此, 提高显示扫描频率, 将非自然信号转移到人眼所不敏感的更高频率, 就可以产生主观效果更好的高质量图像^[2]。把电视信号显示的场扫描频率从 50 Hz 倍频到 100 Hz 是一种已得到商业应用的解决上述问题的方法。但是当视频序列图像中有运动发生时 (在实际视频序列中, 总是有运动发生的), 简单的场重复频率提升方法会导致图像的抖动或模糊^[3], 严重影响视频序列图像的主观质量。比较复杂的基于非线性技术或运动估计的场频率提升扫描频率转换方法在文献 [3, 4] 中都有提到。随着硬件技术水平的提高, 运动估计算法的成熟和所需硬件 (如场存储器或帧存储器) 成本的降低, 实现具有更大计算复杂度的运动补偿帧频提升的高性能扫描格式转换已经

[收稿日期] 2000-09-18; **修回日期** 2000-12-07

[基金项目] 国家“九五”攻关资助项目 (96-120-28)

[作者简介] 吴 勇 (1969-), 男, 辽宁海城市人, 西安交通大学博士研究生

成为可能。

2.1 算法的提出及原理

帧频提升原理如图 1 所示，其中 T 为原始图像序列中两连续帧之间的时间间隔或称之为帧周期。引入一个内部参数 α ($0 \leq \alpha \leq 1$)，该参数决定了插补帧在时域中相对原始帧的位置，原始帧是指经过隔行到逐行变换后得到的逐行帧，这里作为帧频提升算法的输入帧。参数 α 的引入是基于以下考虑：Roberto Castagno 等提出了一种帧频提升方法^[5]，可把输入的 50 Hz 的帧频提升到 75 Hz，帧频提升率为 1.5。即当输入和输出帧频分别为 $f_{\text{输入}}$ 和 $f_{\text{输出}}$ 时，有 $f_{\text{输出}} = 1.5 f_{\text{输入}}$ 。但是，根据实际的需要，为了满足不同输出帧频的要求，这里提出采用一种可变的帧频提升因子 k ，控制帧频提升的比例，使得： $f_{\text{输出}} = k f_{\text{输入}}$ 。因此，对于可变的帧频提升，引入参数 α 就是为了能够准确表达在时域中插补帧相对于原始帧的位置。对于提升率为 2 的帧频提升方法，插补帧在时域中的位置容易确定，参数 α 可选取固定的 0.5。然而对于可变的帧频提升因子，插补帧在时域中的位置确定也相对复杂，在输入 k 值不变的情况下，对于不同的插补帧，参数 α 也可能要选取不同的值，将在后面介绍。

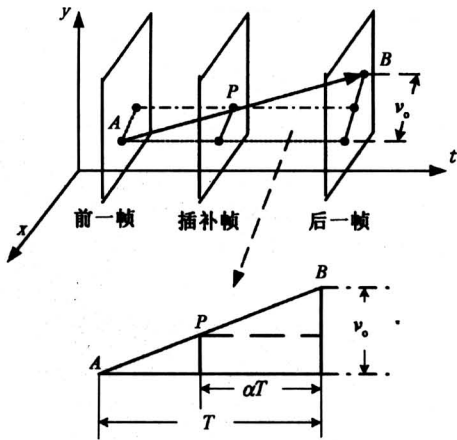


图 1 帧频提升原理示意图

Fig.1 The scheme of scan rate up-conversion

在已知参数 α 的情况下，设前一原始帧（图 1 中的前一帧）中的一点 A，经过时间 T 后，移动了一个运动矢量 v_0 ，到达了后一原始帧（图 1 中的后一帧）中的位置 B 点，P 点即为 A，B 两点在插补帧中的插补点。以下的讨论基于这样一个假

设^[2]：两个连续原始帧间的任何运动都是匀速直线运动。把图 1 中 A，P，B 三个像素点的运动矢量分别表示为 $X_A(x_A, n-1)$ ， $X_P(x_P, n)$ ， $X_B(x_B, n+1)$ ，这里 n 表示图像序列的插补帧， $n-1$ ， $n+1$ 表示原始图像序列中在插补帧前后的两个连续帧，则有

$$\begin{aligned} x_A &= x_P - (1 - \alpha)v_0, \\ x_B &= x_P + \alpha v_0. \end{aligned} \quad (1)$$

因此，又可以把 A 点和 B 点用 P 点的矢量 x_P 分别表示为： $X_A(x_P - (1 - \alpha)v_0, n-1)$ ， $X_B(x_P + \alpha v_0, n+1)$ 。这样，通过参数 α ，很容易确定与插补点 P 相对应的 A，B 两点的位置。可以认为 A，P，B 三点是运动物体上的同一点，这样 P 点的像素值就可以通过 A，B 两点得到。

A，B 两点是否正确选取完全决定了插补帧中 P 点像素值的正确性，而运动矢量 v_0 又可决定 A，B 两点的选取，这就要求获得可信度高的运动矢量场。

2.2 一些关键问题

如文献 [2] 所述，运动补偿方法能够有效地用于运动区域的分辨率提高和闪烁消除。但是，由于运动补偿帧频提升过程中错误运动矢量或误差等可能存在，仍有可能造成图像质量下降。下面讨论了运动补偿帧频提升存在的一些关键问题。

2.2.1 问题 1：参数 α 的确定 由上一节可知，参数 α 决定了插补帧相对原始帧在时域中的位置，它在很大程度上，由不同的输入帧频提升因子 k 确定。而由于插补帧在时域中插补的非线性，即使在相同 k 值的情况下，对于不同的插补帧，参数 α 需要选取不同的值。因此，在 k 值可变的情况下，求解出参数 α 的值对硬件实现有很大难度。一般情况下，可设 k 为有理数，即 $k = m/l$ ，则插补方法是以 l 帧插补出 m 帧的方式周期性进行，因此 α 也呈周期性变化，且最小正周期为 m 。在输入帧频提升因子 k 已知的情况下，一个周期内的第 i 帧对应的 α 值为

$$\alpha = \frac{i(k-1)}{k}, \quad 0 \leq i \leq m. \quad (2)$$

整个插补过程中的第 n 个插补帧的位置参数 α 可以表示为输入变量 k 和 n 的函数，如式 (3) 所示：

$$\alpha = T(n, k) - E(T(n, k)) = \frac{n(k-1)}{k} - E\left(\frac{n(k-1)}{k}\right),$$

$$\left(\begin{array}{c} k > 1 \\ n \in [0, 1, 2, 3, \dots, N] \end{array} \right). \quad (3)$$

其中, 函数 $E(x)$ 表示对变量 x 取整, 即 $\leq x$ 的最大整数, 如 $E(0.3) = 0$, $E(1.8) = 1$ 。从上式可知, α 是周期函数, 且有 $0 \leq \alpha < 1$ 。例如, 当 $k = 1.5$ 时, 有 $\alpha = \{0, 1/3; 2/3, 0, 1/3, 2/3, \dots, | n \in [0, 1, 2, 3, \dots, N]\}$ 。一方面, α 具有周期函数的性质, 看到了实现可变参数帧频提升的可能性, 但仍能看出采用公式求解硬件实现的难度; 另一方面, 即使求解出参数 α , 当参数值等于 0.5 时, 参与硬件的后续运算是很容易实现的, 但对于不等于 $1/2^n$ 的参数值, 参与硬件的后续运算, 它的实现仍然较困难。

2.2.2 问题 2: 运动补偿块及基于块匹配的运动估计 运动补偿帧频提升的效果依赖于运动矢量的可靠性。成功的运动估计算法的关键是高效地利用视频图像序列中存在的时域冗余量。在现存的各种运动估计算法中, 块匹配算法 (BMA) 由于其软件计算和硬件实现的简单性而被广泛地应用在许多视频压缩标准和视频处理系统中。块匹配算法的基本思想是把每一帧图像分割为一系列的矩形块, 通过不同的搜索方法在参考帧的搜索窗内为当前帧寻找一个匹配块。不同的搜索方法形成了不同的运动估计方法。

一个问题是补偿块与匹配块的大小。初期的实验表明, 块匹配运动估计中, 大小为 4×4 的较小匹配块要比较大的如 10×10 或 16×16 像素点的较大匹配块产生较多的不正确的运动矢量 (MV)。然而, 16×16 像素点的运动补偿块对于运动补偿帧频提升的插补算法显得太大, 较小的“ 5×5 ”的或“ 3×3 ”的, 更适合精确的帧频提升插补。因此, 运动补偿的设计要求: 用于补偿的块要小, 而用于运动估计的匹配块又不能太小。

另一个问题是运动估计的计算复杂度。一方面要保证运动估计算法能够获得可信度高的运动矢量场; 另一方面, 由于硬件资源的有限度, 又要求算法尽可能简单易于硬件实现。

2.2.3 问题 3: 合适的插补方法的选取 在获得视频序列的运动矢量场后, 在两原始帧之间进行的插补就可通过在两原始帧上进行移位计算来实现。即可使得插补点 $X_P = X_A$ 。但是, 这是假设运动矢量场总能给出运动视频精确的或可信度高的描述, 而以上的这种假设在实际应用中并不有效, 这是由

于下面几个原因: 光照条件的改变, 物体的重叠, 噪声造成的矢量误差。因此, 运动补偿的设计就要求对于误差有很好的鲁棒性。

3 算法的实现

实现所提出的新的自适应帧频提升算法的结构框图见图 2, 根据这里提出的算法的基本原理以及算法所存在问题的关键点, 主要采用了基于块匹配的空间递归运动估计, 用于快速高效确定内部参数 α 的 k 因子查找表, 以及对误差有很好鲁棒性的加权中值滤波等方法。

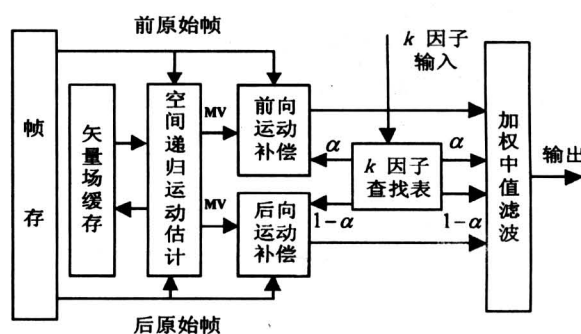


图 2 帧频提升自适应算法结构框图

Fig.2 The block scheme of adaptive scan rate up-conversion algorithm

3.1 空间递归块匹配运动估计

空间递归块匹配运动估计方法的提出主要是针对前述的问题 2。为了适合硬件的实现, 引入文献 [6] 所述的两个假设:

假设 1 运动矢量场是连续的, 保证通过修改空间相邻补偿块的运动矢量可以得到当前补偿块的运动矢量。

假设 2 物体都有惯性, 保证任何两连续帧间的运动都是一致的, 而且由于两帧的时间间隔很短, 两帧间的运动矢量长度较小, 可以设定一个可检测到的水平和垂直最大运动范围来减少运动矢量的搜索范围, 提高算法效率。

针对补偿块与匹配块的大小问题, 采用了图 3 所示的补偿块与匹配块。补偿块大小为 3×3 像素点, 但是, 运动矢量 (MV) 并不仅仅由 3×3 像素点决定, 块匹配误差 (BME) 为大小 5×3 个补偿块的匹配误差和。参考图 1, 设 A 块、B 块和 P 块是分别以图 1 中 A、B 和 P 三点为中心的 3×3 补偿块, 具体步骤如下:

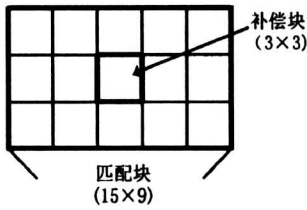


图 3 补偿块与匹配块

Fig.3 Compensation block and matching block

步 1 确定要插补的补偿块 P 块的待测运动矢量 根据假设 1, 设当前要插补的补偿块 P 块为 (x, y, n) , 用前一补偿块 $(x-1, y, n)$ 的运动矢量 v 作为参考, 仅仅搜索它的 9 个相邻矢量 $U^{(i)}, i = 1, 2, 3, \dots, 9$, 并作为待测运动矢量, 如式 (4) 和表 1 所示:

$$U^{(i)} = (u_x^{(i)}, u_y^{(i)}), i = 1, 2, \dots, 9. \quad (4)$$

表 1 (x, y) 点的待测运动矢量集

Table 1 The candidate vector set of pixel (x, y)

$U^{(1)} = (v_x - 1, v_y - 1)$	$U^{(2)} = (v_x, v_y - 1)$	$U^{(3)} = (v_x + 1, v_y - 1)$
$U^{(4)} = (v_x - 1, v_y)$	$U^{(5)} = (v_x, v_y)$	$U^{(6)} = (v_x + 1, v_y)$
$U^{(7)} = (v_x - 1, v_y + 1)$	$U^{(8)} = (v_x, v_y + 1)$	$U^{(9)} = (v_x + 1, v_y + 1)$

步 2 确定最大搜索窗口 根据假设 2, 本算法设定的所能检测到的最大运动范围是: 水平方向上是 4 补偿块/帧, 垂直方向上是 2 补偿块/帧。这个速度限制就决定了搜索窗最大为 9×5 个补偿块。

步 3 根据待测矢量确定 A 块和 B 块 对于每一个待检测运动矢量 $U^{(i)}$, 参见图 1, 就可以根据参数 α 和要插补的 P 块 (x, y, n) 得到 A 块和 B 块在前后两原始帧中的位置。设 $\Delta X_{n-1}^{(h)}, \Delta Y_{n-1}^{(h)}, \Delta X_{n+1}^{(h)}, \Delta Y_{n+1}^{(h)}$ 分别是两原始帧中 A, B 两点到插补帧 P 点的水平和垂直位移, 且有

$$\begin{aligned} \Delta X_{n-1}^{(h)} &= E(3 \times (1 - \alpha) u_x^{(h)}) \\ \Delta Y_{n-1}^{(h)} &= E(3 \times (1 - \alpha) u_y^{(h)}) \\ \Delta X_{n+1}^{(h)} &= E(3 \times \alpha u_x^{(h)}) \\ \Delta Y_{n+1}^{(h)} &= E(3 \times \alpha u_y^{(h)}) \end{aligned} \quad (5)$$

其中, 函数 $E(x)$ 与式 (3) 中的意义相同。这样, A 块和 B 块在两原始帧中的位置为

$$(x - \Delta X_{n-1}^{(h)}, y - \Delta Y_{n-1}^{(h)}, n - 1) \quad (6)$$

$$(x + \Delta X_{n+1}^{(h)}, y + \Delta Y_{n+1}^{(h)}, n + 1) \quad (7)$$

步 4 块匹配误差 由步 3, 可用块匹配误差 (BME) 来衡量一对匹配块的匹配程度, BME 越

小, 匹配程度越高。但是, 当对统一的大面积背景区域进行检测时, 由于背景区域的一致性, 使 BME 对噪声非常敏感。所以, 噪声将使得利用 BME 标准检测到的运动矢量可能偏离其真实方向, 产生错误的运动矢量。由于采用的是空间递归方法, 该方法具有误差传递性, 对误差的校正需要较长的周期, 无法快速地对运动物体做出正确反应。为了避免上述情况, 对 BME 进行了改进, 提出一种称之为 WBME 的检测标准

$$E_{WBME}^{(h)} = W(x, y) \sum_{l=-2}^2 \sum_{m=-1}^1 E_{BME}^{(h)}(x + l, y + m) \quad (8)$$

其中: l 为水平块位置; m 为垂直块位置 (见图 3); $E_{BME}^{(h)}(x, y)$ 为大小为 3×3 像素点的补偿块的块匹配误差:

$$E_{BME}^{(h)} = \sum_{i=-1}^1 \sum_{j=-1}^1 \left| X(x - \Delta X_{n-1}^{(h)} + i, y - \Delta Y_{n-1}^{(h)} + j, n - 1) - X(x + \Delta X_{n+1}^{(h)} + i, y + \Delta Y_{n+1}^{(h)} + j, n + 1) \right|, \quad (9)$$

$W(x, y)$ 是权值函数。

在 WBME 中引入权值函数 $W(x, y)$, 其目的就是降低噪声的影响, 使得在大面积背景的情况下所检测到的运动矢量尽量保持在 $(0, 0)$ 运动矢量的附近。确定权值函数

$$W(x, y) = 1 + w_x |u_x| + w_y |u_y|, \quad (10)$$

其中, u_x, u_y 为被检测运动矢量的水平和垂直分量, w_x, w_y 分别为对应于两个分量的权值。经过实验得到两个权值的选取范围为 $0.1 \sim 0.5$, 且有 $w_x > w_y$ 。加权块匹配误差加大了靠近 $(0, 0)$ 的运动矢量的权值, 使得在上述情况下, 算法能够快速反映运动变化; 在正常情况下, 由于对应于最相关方向的 BME 总是远小于其它方向的 BME, 这种加权并不影响运动矢量的正确选取。在图 4 中, 给出了 BME 标准与加入权值函数 $W(x, y)$ 后改进的 WBME 标准的实验结果比较。可以看出, WBEM 比 BEM 对噪声有更好的抑制性。

步 5 确定运动矢量 当前要插补的补偿块 P 块的运动矢量可根据式 (11) 获得。式 (11) 中, P 块的运动矢量表示为 v_{best} , $E_{WBME}^{(g)}$ 表示待测矢量集中的最小块匹配误差, 则可以确定 $E_{WBME}^{(f)}$ 所对应的待测矢量 $U^{(g)}$ 即为 P 块的运动矢量。



原始帧 (第6帧)

原始帧 (第7帧)

在帧提升因子 $k = 1.25$ 的情况下

BME 得到的插补帧

WBME 得到的插补帧

图4 BME 与 WBME 的比较

Fig.4 The comparison of BME and WBME

$$v_{\text{best}} = U^{(g)} \quad (11)$$

$$\text{当 } E_{\text{WBME}}^{(g)} = \min_h \{ E_{\text{WBME}}^{(h)} \},$$

使得下一待测的插补块 $(x+1, y, n)$ 以当前 (x, y, n) 的运动矢量 v_{best} 为参考矢量, 重复上面的步骤, 即可获得下一待测插补块的运动矢量。对插补帧中的每一待测插补块进行上述的处理, 就可获得插补帧的运动矢量场。

3.2 非线性加权中值滤波

在获得视频序列的运动矢量场后, 针对前述问题3, 对算法进行后处理是很有必要的。对相邻两帧进行平均而得到插补帧的方法^[5], 其原理如式(12)所示:

$$X_P = \frac{1}{2}(X_A + X_B)。 \quad (12)$$

一种中值方法^[6]的原理如式(13)所示:

$$X_P = \text{med}(X_A, X_{\text{average}}, X_B)。 \quad (13)$$

这里, X_{average} 是对应插补点空间位置的相邻原始帧

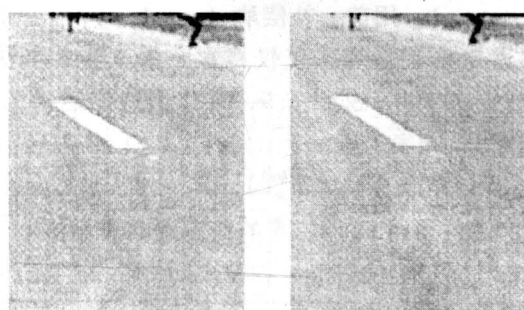
上两点的平均。即

$$X_{\text{average}} = \frac{1}{2}(X_A(x_p, n-1) + X_B(x_p, n+1))。 \quad (14)$$

由于用于插补的相邻两原始帧的贡献不一样, 所以采用加权平均, 即将式(14)进行如下改进:

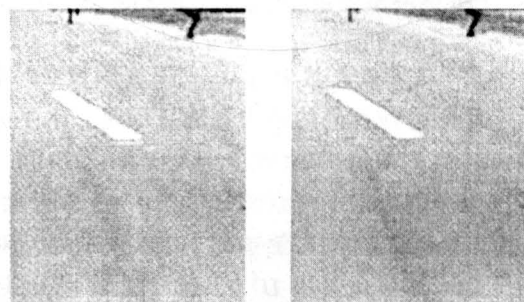
$$X_{\text{average}} = (1-\alpha)X_A(x_p, n-1) + \alpha X_B(x_p, n+1), \quad (15)$$

其中, 加权参数 α 的意义如前所述。这种非线性的方法产生很好的运动补偿插补效果。在图5中给出了实验结果的比较。



原始帧 (第8帧)

原始帧 (第9帧)

在帧提升因子 $k=1.25$ 的情况下

线性平均得到的插补帧

非线性加权中值滤波得到的插补帧

图5 线性平均与非线性加权中值滤波的比较

Fig.5 The linear average filter and nonlinear weighted median filter

3.3 k 因子查找表

如图6所示, k 因子查找表采用了一个8位的地址输入的查找表, 分别是6位的量化后的 k 因子, 2位的帧计数器输入, 输出是8位数据宽度表示的 $1/\alpha$ 和 $1/(1-\alpha)$ 。输出的8位数据也不是通常意义上的对 $1/\alpha$ 和 $1/(1-\alpha)$ 的表示, 而是高4位数据和低4位数据分别包含着 $1/\alpha$ 和 $1/(1-\alpha)$ 的分子和分母信息。主要依据FPGA中内

嵌的RAM块,实现这种容量为512字节的查找表。这样,一方面实现了内部参数 α 的快速运算,另一方面,对于参数值不等于 $1/2^n$ 的那些值,很容易实现近似运算,以便参与硬件的后续运算。显而易见, k 因子查找表有很好的实用性。

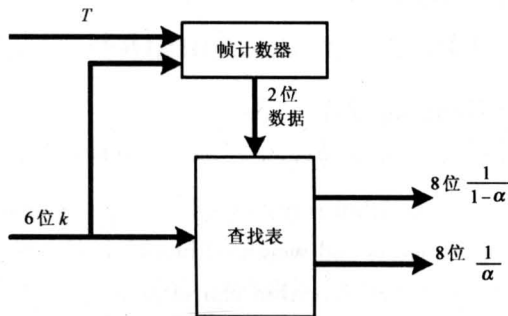


图6 k 因子查找表

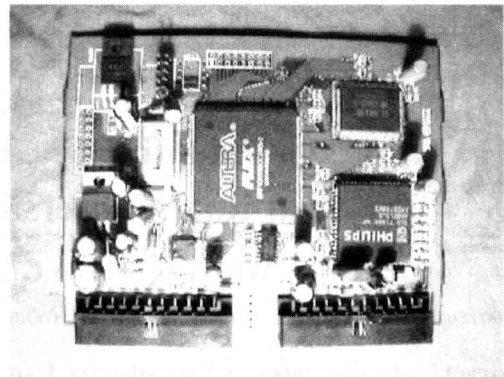
Fig.6 Look-up table of factor k

4 算法的硬件实现

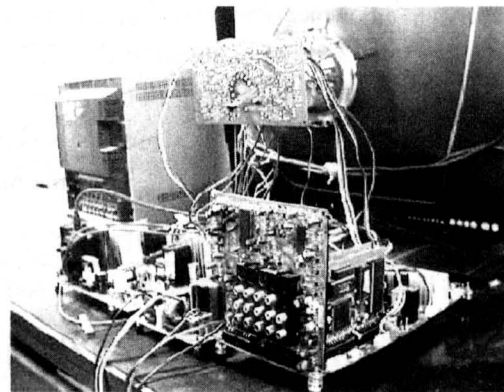
算法在硬件系统中的实现如图7硬件实现系统所示。图7b为数字化电视接收机的整机系统后视图。图7a为整机系统中的一个核心处理模块,实现扫描格式转换功能。本算法是在该模块中的现场可编程逻辑器件(FPGA)中实现。在FPGA中,还包含了自适应隔行到逐行变换和图像处理算法等本文未讨论的算法。一片容量约为5万门的FPGA,本算法用了总资源的32%,用了FPGA内部50%的RAM资源。在帧频提升因子 k 从1到1.5的变化范围内,该算法得到了很好的应用效果。

5 结论

本文讨论了在视频处理领域扫描格式转换中比例可变的帧频提升的插补方法,提出了一种自适应帧频提升算法,该算法采用空间递归块匹配进行运动估计和加权中值滤波进行运动补偿,通过 k 因子查找表实现实时处理。还基于FPGA对算法进行了硬件实现,成功地应用到实际系统中。算法快速有效,有实用价值。这种算法进一步完善,对实现FPGA芯片到专用集成电路(ASIC)转化具有重要的工程意义。



a. 核心处理模块



b. 整机系统后视图

图7 硬件实现系统

Fig.7 The hardware system

参考文献

- [1] de Haan G, Bellers E B. Deinterlacing—an overview [A]. Proceeding of The IEEE [C], 1998, 86: 1839~1857
- [2] Hentchel C. Linear and nonlinear procedures for flicker reduction [J]. IEEE Trans Consumer Electron, 1987, Ce 33: 192~198
- [3] de Haan G, Kettenis J, Deloore B. IC for motion compensated 100 Hz TV with a smooth-motion movie-mode [J]. IEEE Transactions on Consumer Electronics, 1996, 42: 165~174
- [4] Haavisto P, Juhola J, Neuvo Y. Motion adaptive scan rate up-conversion [J]. Multidimensional Systems and Signal Processing, 1992, 3: 113~130
- [5] Castagno R, Haavisto P, Ramponi G. A method for motion adaptive frame rate up-conversion [J]. IEEE Trans

actions on Circuits and Systems for Video Technology, 1996, 6: 436~446

[6] de Haan G. IC for motion-compensated de-interlacing,

noise reduction, and picture-rate conversion [J]. IEEE Transactions on Consumer Electronics, 1999, 45: 617~624

A New Adaptive Frame Rate Upconversion Algorithm for Scan Rate Conversion and Its FPGA Implementation

Wu Yong, Zhang Guanglie, Zheng Nanning, Zhang Xia

(Institute of Artificial Intelligence and Robotics of Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

[Abstract] In this paper, a new adaptive frame rate upconversion algorithm is presented, and its rapid implementation method in hardware is further discussed. With inner parameters and weighted block-matching error, the algorithm implements adaptive motion compensation. Therefore, this algorithm can effectively reduce the noise-interference and the hardware realization complexity. By using a look-up table that corresponds to the adjustable parameter and employing FPGA, the algorithm for scan format conversion is realized. Its application in practical system shows that this algorithm is very efficient.

[Key words] scan format conversion; frame rate up-conversion; block-matching; motion compensation

半导体氧化物纳米带结构首次被发现

半导体氧化物纳米带状结构首次在世界上被发现并合成,这是继1991年发现多壁碳纳米管和1993年合成单壁碳纳米管以来一维纳米材料合成领域的又一重大突破。该现象是美国亚特兰大佐治亚理工学院的三位中国科学家发现的,其学术带头人王中林教授曾在1997年获得我国国家自然科学基金首批海外青年合作研究基金的资助。该工作于今年3月9日发表在美国著名的《科学》杂志上,引起了国际纳米科技界的极大关注,被评为美国本周的重大科技新闻。哈佛大学查尔斯·李玻尔教授评价说,“其重大意义在于它发现了一种新的具有独特形貌而无缺陷的半导体氧化物体系,这在纳米物理研究和纳米器件应用中是非常重要的”。

半导体氧化物是功能和智能材料的基础,它们是制造功能元件的必须材料。半导体氧化物在透明导体、平板显示、气相液相传感和传感器及智能玻璃等领域有重要的应用前景。它们每年的商业销售量高达200亿美元。美国亚特兰大佐治亚理工学院纳米科学和技术中心主任王中林教授、潘正伟博士和戴祖荣博士利用高温固体气相法,成功地合成了近一维氧化锌、氧化锡、氧化镉、氧化镉和氧化镓等宽带半导体体系的带状结构。这些带状结构纯度高、产量大、结构完美、表面干净,且体内无缺陷、无位错,是理想的单晶线型薄片结构。带状结构的横截面是一窄矩形结构,带宽为30~300 nm,厚度为5~10 nm,而长度可达几毫米。和碳纳米管以及硅和复合半导体线状结构相比,这是迄今唯一被发现具有结构可控且无缺陷的宽带半导体准一维带状结构,而且具有比碳纳米管更独特和优越的结构和物理性能。这种结构是可以用来研究一维功能和智能材料中光、电、热输运过程的理想体系。王中林教授等发现的这些半导体氧化物带状结构可以使科学家用一单根氧化物纳米带做成纳米尺寸的气相、液相传感和传感器或纳米功能及智能光电元件,为纳米光电学打下坚实的基础。