

时空权重和边缘自适应去隔行

丁 勇 陆生礼 时龙兴

(东南大学国家专用集成电路系统工程技术研究中心 南京 210096)

摘 要 为实现隔行扫描到逐行扫描的视频格式转换,文中提出了一种时空权重和边缘自适应的去隔行算法,主要包括4个同极性场运动估计、小角度边缘搜索、时空权重计算、自适应插值等.运动估计通过比较同极性场的像素块绝对值差和(SAD)与运动阈值实现运动估计,并且利用前一场的运动信息进行鲁棒性处理,提高运动检测的精度.小角度边缘搜索采用自适应搜索半径的方法实现最小 6° 的小角度边缘检测.最后,通过时空权重自适应的插值算法实现去隔行处理,取得很好的处理效果.

关键词 运动估计;边缘搜索;时空权重自适应插值;去隔行

中图法分类号 TP391

Spatio-Temporal Weight and Edge Adaptive De-Interlace

DING Yong LU Sheng-Li SHI Long-Xing

(National Engineering Research Center for Application Specific Integrated Circuit System, Southeast University, Nanjing 210096)

Abstract The function of de-interlace is to convert interlaced images to progressive ones. In this paper, a de-interlacing algorithm based on spatio-temporal weight and edge direction is presented. It consists of 4 same-parity fields motion estimation, low-angle edge detection, spatio-temporal weight calculation, and adaptive interpolation. Same-parity fields are used to improve the accuracy of motion estimation. It estimates the motion by comparing the sum of absolute block difference (SAD) between 4 fields with the threshold of motion. And it detects low-angle edge using an adaptive searching radius in which the 6° edge can be detected. Experimental results show that the proposed method achieves high image quality and low hardware complexity.

Keywords motion estimation; edge detection; spatio-temporal adaptive interpolation; de-interlace

1 引 言

高质量的去隔行是实现视频信号从隔行到逐行扫描格式转换的关键技术^[1-2],其目的是消除隔行扫描中的行间闪烁、行蠕动、并行和锯齿化等固有缺陷.去隔行技术大致可以分为线性滤波、运动自适应和运动补偿三类.线性滤波法^[3]主要包括行复制、行平均、场合并等,优点是结构简单,缺点是行复制、行

平均法并不能增加图像的垂直分辨率,而且在处理运动图像时会带来锯齿、羽化等缺陷.自适应插值法^[4-6]则是根据运动信息将视频图像区分运动或静止区域,对静止区域采取线性滤波法,对运动区域采取场内非线性滤波的方法进行插值.这类方法的优点是能够在静止区域增加垂直分辨率,并且能够消除运动区域的羽化现象;缺点是无法提升运动区域的垂直分辨率,而且由于运动估计的失误会带来插值错误等缺陷.运动补偿法^[7-9]最大限度地利用了视

收稿日期:2006-01-17;修改稿收到日期:2006-08-31.本课题得到江苏省专用集成电路设计重点实验室开放研究课题(JSICK0405)资助.
丁 勇,男,1974年生,博士研究生,主要研究方向为 VLSI 设计、视频编解码、图像处理等. E-mail:dyasic@163.com. 陆生礼,男,1965年生,博士,教授,主要研究领域为图像处理、视频编解码等. 时龙兴,男,1964年生,教授,博士生导师,主要研究领域为 VLSI 设计、视频处理等.

频信号时间和空间上的相关信息,是三类算法中性能最好的一类.它先进行精确的运动检测,然后沿着运动轨迹进行插值.但这类算法对运动估计误差极其敏感,可能由于错误的运动估计造成局部失真,而且运算复杂度很高、电路资源的消耗很大.

本文提出一种时空权重和边缘自适应的去隔行算法,主要包括鲁棒的4场同极性场运动估计、小角度边缘搜索、时空插值权重计算、自适应插值.

2 运动估计

影响去隔行处理效果的决定性因素之一是正确地对输入视频信号进行运动估计,并按照运动估计的结果将视频图像划分为运动或静止区域,从而采取相应的去隔行处理技术^[10-11].

2.1 同极性场运动估计

视频信号按奇偶场的次序依次传输,每隔一场极性相同,时间方向上的视频信号场结构如图1所示.其中, t 与 $t-2$ 场极性相同, $t-1$ 与 $t-3$ 场极性相同.由于奇场和偶场的数据在场方向相同位置上不尽相同,传统的采用相邻场(即不同极性场)的运动检测方法会带来一些问题,尤其对于静止图像水平边缘的检测会产生错误的判断,从而导致爬行效应.本文通过计算同极性场(奇场-奇场或偶场-偶场)的像素块绝对值差和(Sum of Absolute Pixel Block Difference, SAD)实现对视频图像的运动估计^[12].SAD定义为

$$SAD(i, j; t) = \sum_{k=-m}^m \sum_{l=-n}^n |X(i+k, j+l; t) - X(i+k, j+l; t-2)| \quad (1)$$

其中, m, n 定义了一个 $(2m+1) \times (2n+1)$ 的像素块,本文采用的像素块的大小为 5×3 ,即 $m=2, n=1$,包含15个像素点. $X(i, j; t)$ 为像素块的中心像素(当前像素)的灰度值, k 和 l 为水平和垂直方向的偏移量, $X(i+k, j+l; t)$ 和 $X(i+k, j+l; t-2)$ 分别

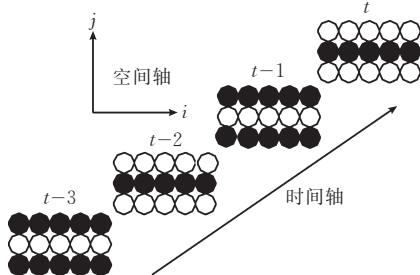


图1 视频信号场结构示意图

为第 t 和 $t-2$ 场图像的像素灰度值, $t-2$ 场图像是通过外部SDRAM进行缓存实现的.

为实现SAD的计算需要把串行视频信号转化为并行的3行视频信号,所以必须引入容量足够大的行存储单元缓存串行的视频输入数据.在电路实现中可以采用2个高速低功耗FIFO和4级寄存器实现视频信号的延迟和像素的矩阵变换,实现 5×3 像素块.

分别在 Y (亮度)和 UV (色度)通道上计算SAD值 SAD_Y 和 SAD_{UV} :

$$SAD_Y(i, j; t) = \sum_{k=-2l=-1}^2 \sum_{l=-1}^1 |Y(i+k, j+l; t) - Y(i+k, j+l; t-2)| \quad (2)$$

$$SAD_{UV}(i, j; t) = \sum_{k=-2l=-1}^2 \sum_{l=-1}^1 |UV(i+k, j+l; t) - UV(i+k, j+l; t-2)| \quad (3)$$

然后将 Y 和 UV 通道上的 SAD_Y 和 SAD_{UV} 求和得到当前像素总SAD,即

$$SAD(i, j; t) = SAD_Y(i, j; t) + SAD_{UV}(i, j; t) \quad (4)$$

当前像素对应的 $SAD(i, j; t)$ 与预先设置的运动阈值(threshold)进行比较,判断当前像素是否运动,得到当前像素的运动向量 $MV(i, j; t)$.如果当前像素对应的 $SAD(i, j; t)$ 大于运动阈值,则认为当前像素为运动像素, $MV(i, j; t)=1$;否则,认为当前像素为静止像素, $MV(i, j; t)=0$.即

$$MV(i, j; t) = (SAD(i, j; t) > threshold) \quad (5)$$

其中,threshold由MCU通过 i^2c 进行配置,在实验中选择 $threshold=50$.

在SAD计算的同时,计算像素 $X(i, j; t)$ 和 $X(i, j; t-2)$ 的绝对差值,作为当前像素的时域差值 TD ;计算二者的平均值,作为当前像素的时域均值 PT ,输出给后续的时空自适应插值模块.

$$TD(i, j; t) = |X(i, j; t) - X(i, j; t-2)| \quad (6)$$

$$PT(i, j; t) = (X(i, j; t) + X(i, j; t-2))/2 \quad (7)$$

2.2 运动向量的4场鲁棒处理

由于相邻同极性场之间相差一场,对于快速运动的物体,其部分运动轨迹会超出同极性两场像素块的探测范围,从而造成运动估计出错.为了消除这种误差,除了比较 t 和 $t-2$ 场的SAD得到运动向量 $MV(i, j; t)$ 外,还利用 $t-1$ 和 $t-3$ 场得到的运动向量 $MV(i, j; t-1)$ (即前一场对应像素点的运动信

息),二者联合求或(并集),得到鲁棒的运动向量 $MV_R(i, j; t)$. 即

$$MV_R(i, j; t) = MV(i, j; t) \parallel MV(i, j; t-1) \quad (8)$$

也就是说,只有当 t 与 $t-2$ 场和 $t-1$ 与 $t-3$ 场 4 场图像同时估计为静止时,才将当前像素认为是静止像素,否则为运动像素. 为了实现当前场运动向量与上一场运动向量进行比较,也需要 SDRAM 对上一场运动向量进行暂存.

3 小角度边缘搜索

固然,在运动自适应的去隔行算法中,正确的区分静止和运动很重要. 但是,对于运动图像中边缘信息的准确检测,并在空间插值滤波器中合理应用边缘信息对提高图像质量也相当关键.

基于边缘的行平均(ELA)算法在去隔行中得到广泛应用,但是,它的致命缺陷是对水平边缘的检测能力很弱,只能检测 45° 、 90° 和 135° 边缘,对于小角度边缘则无能为力^[6,13]. 为此,Kuo 等人提出 $3+3$ taps 的 ELA 算法,并且通过比较相邻像素的差值来改善对图像水平边缘的检测^[6],Lee 等人将 $3+3$ taps 的 ELA 算法扩展为 $5+5$ ^[14],Haan 等人则扩展为 $7+7$ taps^[15]. 这些改进虽然增强了 ELA 对较小角度边缘的检测能力,但是仍然无法检测接近水平的边缘,即使是 $7+7$ taps 也只能检测到最小 18° 的边缘,而且固定抽头的滤波器设计方法对于硬件电路的设计并不是很好的方案.Chang 等人提出 EIELA 算法^[16],这种自适应方法的思路不错,只是其中的判断计算量很大,硬件实现的难度和复杂度较大.

为提高水平边缘的检测能力,本文提出的小角度边缘搜索改进算法主要包括两个方面:(1)增大搜索范围(半径),左右最大各搜索 8 个点,并且采用自适应搜索的设计方法,从而减小硬件的复杂度;(2)增加对边缘方向上相邻像素的考虑,实现半像素精度,提高边缘检测的精度.

边缘搜索示意如图 2 所示,其中黑点代表待插补的像素 $x(i, j)$,上下两行的像素点的对角线方向代表可能的边缘方向. 其基本原理是:通过比较对角线上的像素绝对差值判断对角线对应像素与待插补像素的相关性,绝对差值越小相关性越大,最小差值对应的方向就是边缘方向. 在计算中采用并行处理架构,将上下行的对角像素分为 3 部分:(1)中间部分,只有 90° 一个方向的两个像素 $x(i, j-1)$, $x(i, j+1)$;(2)向左搜索部分,包括 $j-1$ 行上 $x(i, j-1)$

右边的像素和 $j+1$ 行上 $x(i, j+1)$ 左边的像素;(3)向右搜索部分,包括 $j-1$ 行上 $x(i, j-1)$ 左边的像素和 $j+1$ 行上 $x(i, j+1)$ 右边的像素. 同时计算这三部分对角像素的绝对差值,分别得到中间部分绝对差值 D_m 、左边部分绝对差值 L_1, L_2, \dots, L_8 和右边部分绝对差值 R_1, R_2, \dots, R_8 . 即

$$D_m = |Y(i, j-1) - Y(i, j+1)| \quad (9)$$

$$L_n = |Y(i+n, j-1) - Y(i-n, j+1)|, \quad n = 1, 2, \dots, 8 \quad (10)$$

$$R_n = |Y(i-n, j-1) - Y(i+n, j+1)|, \quad n = 1, 2, \dots, 8 \quad (11)$$

其中, $Y(i, j)$ 表示像素 $x(i, j)$ 的亮度分量值,其它同义.

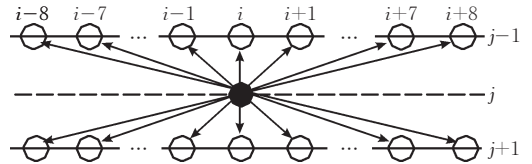


图 2 小角度边缘搜索

在小角度边缘搜索中,为减少计算量和硬件资源的消耗,采取自适应搜索半径的检测方法,在进行向左或向右顺序搜索的过程中每一级计算结束后都要将差值与上一级进行比较(第一级的差值与 D_m 进行比较),如果绝对差值一直保持减小趋势则继续进行搜索,直到 $tap=8$,如果出现相反的变化趋势,则停止搜索. 然后比较这些差值选择出最小的绝对差值 D ,此最小差值对应的对角方向就是大致的边缘方向.

$$D = \min(D_m, L_1, \dots, L_n, R_1, \dots, R_n) \quad (12)$$

通过最小绝对差值 D 的选择方法可以检测到 90° , 45° (135°), 26.57° (123.43°), 18.43° (161.57°), 14° (164°), 11.3° (168.7°), 9.46° (170.54°), 8.13° (171.87°), 6.34° (173.66°)(与水平方向夹角)的边缘,边缘最小间隔角度为 1.79° ,检测到的最小角度为 6.34° .

为了得到更精确的边缘方向,在通过最小绝对差值 D 得到的边缘方向的基础上再增加对邻近像素的考虑,如图 3 所示. 如果 D 对应的方向是 $X_R - X_L$,则增加对邻近像素 X_{L-1} 和 X_{L+1} 的考虑,分别算 $X_R - X_{L-1}$ 和 $X_R - X_{L+1}$ 的绝对差值 D_{L-1} 和 D_{L+1} ,然后求三者的最小值 ND , ND 对应的方向就是边缘的方向.

$$ND = \min(D_{L-1}, D_{L+1}, D) \quad (13)$$

同时,计算这两个像素的差值为当前像素的空域差值 SD 和它们的平均值为当前像素的空域均值 PS ,输出给时空权重自适应插值模块.

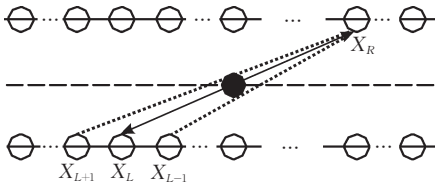


图3 考虑邻近像素的搜索

$$SD = \begin{cases} |X_R - X_{L-1}|, & ND = D_{L-1} \\ |X_R - X_{L+1}|, & ND = D_{L+1} \\ |X_R - X_L|, & ND = D_L \end{cases} \quad (14)$$

$$PS = \begin{cases} (X_R + X_{L-1})/2, & ND = D_{L-1} \\ (X_R + X_{L+1})/2, & ND = D_{L+1} \\ (X_R + X_L)/2, & ND = D_L \end{cases} \quad (15)$$

通过增加邻近的像素,可以使检测到的边缘更加接近水平,比传统算法增加了 63.4° (116.6°), 33.7° (146.3°), 21.8° (158.2°), 15.9° (164.1°), 12.5° (167.5°), 10.3° (169.7°), 8.7° (171.3°), 7.6° (172.4°), 6.7° (173.3°), 6.0° (174°) 等角度边缘的检测能力,边缘最小间隔为 0.7° ,检测的最小角度为 6° ,大大提高了边缘检测的精度.小角度边缘检测的电路架构如图4所示.

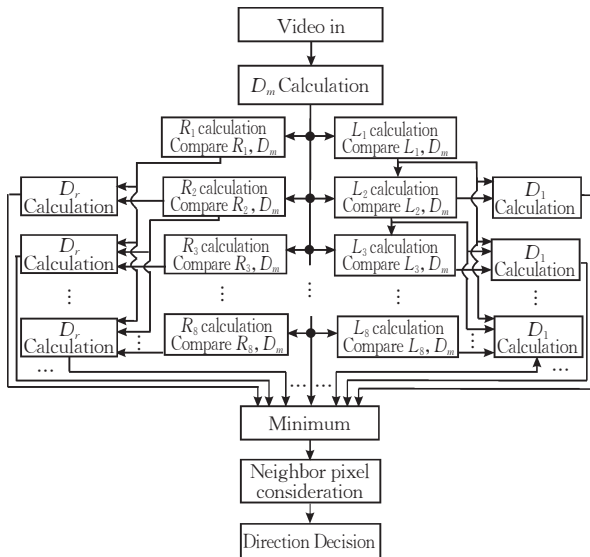


图4 边缘检测电路架构

4 时空权重自适应插值

本文的去隔行算法是运动自适应的,其流程图如图5所示.对于4场运动估计得到的运动向量 $\mathbf{MV}_R(i, j; t) = 0$ 的区域,即静止区域,采用场合并 (weave) 的方式进行插值,提高图像的垂直分辨率,恢复视频图像原有的帧结构;对于运动向量 $\mathbf{MV}_R(i, j; t) = 1$ 的区域,即运动区域,采用时空权重自适应插值,有效克服运动估计误差和边缘检测不准带来

的插值错误,自动融合场合并和边缘自适应场内插值的优点.

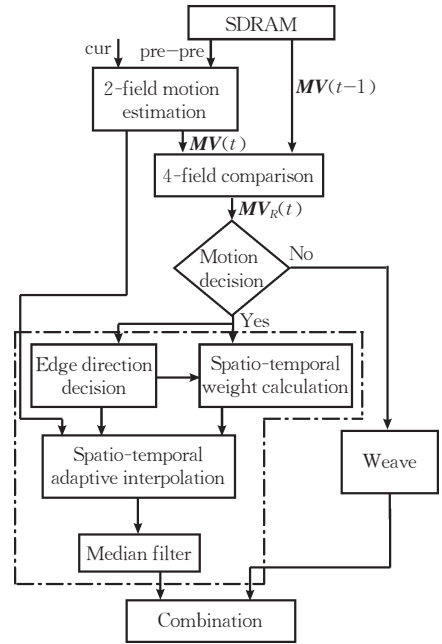


图5 时空和边缘自适应去隔行流程图

时空权重自适应插值如图5虚线框中所示,主要步骤为

1. 时空权重计算单元利用前后场对应像素的绝对差值——时域差值 (TD) 和场内沿边缘方向的上下行对角像素的差值——空域差值 (SD),判断时间和空间的相关性,分别计算出时域权重系数 (k_T) 和空域权重系数 (k_S).对于 TD 较小的像素,其时间相关性较大,插值时应更侧重时间方向的滤波,即 k_T 取较大的值;对于 SD 较小的像素,其空间相关性较大,插值时应更侧重空间方向的滤波,即 k_S 取较大的值.

$$k_T = SD / (SD + TD) \quad (16)$$

$$k_S = 1 - k_T \quad (17)$$

2. 按照步1得到的权重系数对 PT 和 PS 进行加权平均得到待插补点的估计值 (P'):

$$P' = PT \times k_T + PS \times k_S \quad (18)$$

对于运动大 (k_S 值较大) 的区域更倾向于空间插值——场内边缘自适应插值滤波器;对于运动较小 (k_T 值较大) 的区域更倾向于时间插值;对于静止区域采用场合并的时间插值方法.

3. 插值后的像素值 P' 与上下行的相邻像素值有可能相差太过悬殊,引起的图像突兀变化和点闪烁现象.为了避免这种现象,需要对当前场像素点 $X(i, j-1; t)$, $X(i, j+1; t)$ 和待插补像素点的估计值 P' 进行中值滤波处理,得到最终的插补像素 P , 即

$$P = \text{median}(X(i, j-1; t), X(i, j+1; t), P') \quad (19)$$

5 实验结果及分析

去隔行的实验处理结果比较如图6所示.图中

(a)和(b)所示的钟摆视频信号是十分经典的检验去隔行对文字、边缘保护、插值精度等性能处理效果的测试图像. 其中,(a)为源信号中的偶场图像;(b)为源信号中的奇场图像;(c)传统场内插值去隔行算法的处理效果;(d)传统运动自适应去隔行算法的处理效果;(e)为本文所提出的去隔行算法的处理效果.

如图 6(a),(b)所示,“钟摆”源图像可以分为三部分:钟摆的悬杆、符号“OK”和图像右下角旋转的图标.“OK”可以用来检验运动检测的准确度;钟摆的悬杆和旋转的图标用于检验小角度边缘的搜索能力和边缘自适应的插值精度.

符号“OK”由只存在于偶场的“O”和只存在于奇场的“K”组成,也就是说,“O”和“K”分别存在于不同极性的场中,所以如果采用相邻场(不同极性)来进行运动检测,将会把此处判断为运动区域而选择场内插值算法,从而丢失“K”或者“O”,如图(c)所

示的处理结果. 正确的处理方法应当是采用同极性场的运动检测,判断此处为静止区域而选择场合并的方法进行插值,效果如图(e)所示.

钟摆的悬杆和旋转的图标都是快速运动的区域,所以需要采取场内插值的算法. 但是,如果运动检测不准,将其误判为静止区域,或者在场内插值中小角度边缘的搜索能力和插值精度不足也将大大影响去隔行的效果,如图(d)所示. 图(d)中由于场内插值的失误引起钟摆悬杆出现明显的重影现象. 而本文所提出的算法由于具备很强的小角度边缘搜索能力和插值精度,所以可以有效地消除重影现象,并且图像中的边缘更加锐化. 由图(e)可以看出,时空权重和边缘自适应的去隔行算法采用 4 场同极性场的运动检测和小角度边缘自适应的插值技术,融合了场合并和场内边缘自适应插值的优点,克服了传统算法所带来的缺陷,取得了很好的处理效果.

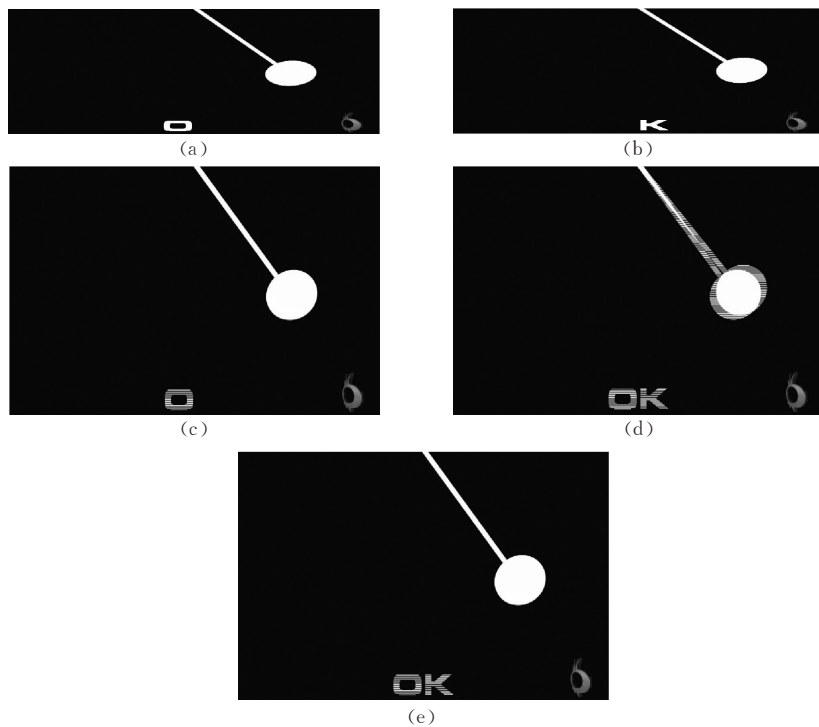


图 6 处理效果比较

6 结 语

本文提出一种时空权重和边缘自适应的去隔行算法,通过 4 场运动估计得到比较精确的运动向量,进行时空权重自适应的插值处理. 本算法的优点是自动融合场内差值和场合并的优点,电路实现简单,工作时钟频率可达 150Hz 以上,得到的视频图像处理效果很好,并且已经被成功地应用到高清晰度电视的数字视频处理芯片中.

参 考 文 献

- [1] Thomas G. A comparison of motion-compensated interlace-to-progressive conversion methods. *Signal Processing: Image Communication*, 1998, 12(3): 209-229
- [2] Wang D, Vincent A, Blanchfield P. Hybrid de-interlacing algorithm based on motion vector reliability. *IEEE Transactions on Circuits and System for Video Technology*, 2005, 15(8): 1019-1025
- [3] Haan G de, Bellers E B. Deinterlacing—An overview. *Proceedings of the IEEE*, 1998, 86(9): 1839-1857

- [4] Han D, Y Shin C, Choi S J, Park J S. A motion adaptive 3-D de-interlacing algorithm based on the brightness profile pattern difference. *IEEE Transactions on Consumer Electronics*, 1999, 45(3): 690-697
- [5] Lin S F, Chang Y L, Chen L G. Motion adaptive de-interlacing with horizontal motion detection and ELA with median//Proceedings of the International Symposium on Circuits and Systems, Bangkok, Thailand, 2003; 696-699
- [6] Kuo C J, Liao C, Lin C C. Adaptive interpolation technique for scanning rate conversion. *IEEE Transactions on Circuits and System for Video Technology*, 1996, 6(3): 317-321
- [7] Jung Y Y, Choi B T, Park Y J, Ko S J. An effective de-interlacing technique using motion compensated interpolation. *IEEE Transactions on Consumer Electronics*, 2001, 46(3): 460-466
- [8] Sugiyama K and Nakamura H. A method of de-interlacing with motion compensation interpolation. *IEEE Transactions on Consumer Electronics*, 1999, 45(3): 611-616
- [9] Tourapis A M, Au O C, Liou M L. Advanced de-interlacing techniques with the use of zonal based algorithm//Proceedings of the Visual Communications and Image Processing, San Jose, CA, 2001; 949-958
- [10] Li R, Zeng B, Liou M L. Reliable motion detection/compensation for interlaced sequence and its applications to deinterlacing. *IEEE Transactions on Circuits and System for Video Technology*, 2000, 10(1): 23-29
- [11] Nguyen A, Dubois E. Spatio-temporal adaptive interlaced-to-progressive conversion//Dubois E, Chiariglione L eds. *Proceedings of the Signal Processing of HDTV*. New York: Elsevier, 1993; 749-756
- [12] Chang Y L, Lin S F, Chen C Y, Chen G. Video de-interlacing by adaptive 4-field global/local motion compensated approach. *IEEE Transactions on Circuits and System for Video Technology*, 2005, 15(12): 1569-1582
- [13] Lee S G, Lee D H. A motion-adaptive de-interlacing method using an efficient spatial and temporal interpolation. *IEEE Transactions on Consumer Electronics*, 2003, 49(4): 1266-1271
- [14] Lee H Y, Park J W, Bae T M, Choi S U, Ha Y H. Adaptive scan rate up-conversion system based on human visual characteristics. *IEEE Transactions on Consumer Electronics*, 2000, 46 (4): 999-1006
- [15] Haan G de, Lodder R. De-interlacing of video data using motion vectors and edge information//Proceedings of the International Conference on Consumer Electronics (2002 Digest of Technical Papers). Los Angeles, USA, 2002; 70-71
- [16] Chang Y L, Lin S F, Chen L G. Extended intelligent edge based line average with its implementation and test method//Proceedings of the International Symposium on Circuits and Systems, Vancouver, Canada, 2004; 341-344



DING Yong, born in 1974, Ph. D. candidate. His research interests include digital image processing, video compression, and VLSI design, etc.

LU Sheng-Li, born in 1965, Ph. D., professor. His research interests include multimedia data compression, image processing, etc.

SHI Long-Xing, born in 1964, Ph. D., professor, Ph. D. supervisor. His current research interests include image processing, VLSI design, etc.

Background

This paper is supported by Jiang Su province key lab of ASIC design under project "Video processor for PDP display" with grand No. JSICK0405. The group is belongs to National Engineering Research Center For Application Specific Integrated Circuit System, Southeast University. In last few years, many works have been done by the research group. Part of their works have been published by some important domestic and oversea publications or proceedings, such as *IEEE Transactions on Consumer Electronics*, *Proceeding of International Symposium on Circuits and Systems*, *Chinese Science Bulletin*, *Journal of Electronics & Information Technology*, etc.

As the PDP panel size is getting larger and larger, the artifacts due to the poor image processing becomes visible and annoy to a viewer, so a good video processor for PDP TV is becoming very important. And, the key point is the algorithm to achieve de-interlace. Among the conventional de-interlacing technologies, the inaccuracy of separating moving areas from stationary areas and detecting low angle edge in images has critical affect to the final result.

In this paper, a motion and edge adaptive de-interlace is proposed. To separate moving and stationary video pixels during the video de-interlacing process, an approach by comparing the sum of absolute block difference (SAD) between same-parity with the threshold of motion is used. The motion estimation approach not only will refer to the motion information of current video field, but will also refer to the information of previous field. Thus, it improved the accuracy of motion estimation greatly. By using this approach, the detection and separation of the stationary and the motion video pixels becomes very efficient and reliable. And, in this paper, a novel method of detecting low angle edge using an adaptive searching radius is proposed. Using this method, we can obtain 6° edge. Based on the motion estimation and edge detection, the proposed de-interlace adopts a spatio-temporal weight adaptive interpolation. Experimental results show that the proposed method achieves high image quality and low hardware complexity. At present, the de-interlacing algorithm has been integrated in video processing SOC for HDTV.