

基于增强型边缘定向插值的运动自适应去隔行^①丁 勇^② 马 斌

(浙江大学超大规模集成电路设计研究所 杭州 310027)

摘 要 为实现隔行扫描到逐行扫描的高质量视频格式转换,提出了一种基于边缘定向插值的运动自适应去隔行算法,主要包括空间加权边缘搜索、边缘定向插值、同极性场间的运动检测和运动自适应插值等。该算法通过增加对边缘的加权拟合和搜索消除伪边缘插值,通过增加边缘方向的预判断抑制反向插值错误,通过边缘搜索的提前终止减小计算量,通过同极性运动检测消除运动检测错误。实验结果表明,基于边缘定向插值的运动自适应去隔行算法在处理图像和视频流时均表现出优异的性能。

关键词 去隔行, 运动自适应, 边缘搜索, 边缘定向

0 引 言

去隔行是实现视频信号从隔行到逐行扫描格式转换的处理技术^[1,2]。高质量的去隔行是视频处理的一个重要课题,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,提高视频图像的垂直分辨率等,使图像更加符合人的视觉特性。

去隔行技术大致可以分为线性滤波法、自适应插值法和运动补偿法三类。线性滤波法的优点是结构简单,缺点是在处理运动图像时会带来锯齿、羽化等缺陷。运动补偿法^[3,4]最大限度地利用了视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,但这类算法计算量最大,对误差极其敏感,而在实际应用中,快速获得准确、可靠的运动矢量是较困难的。自适应插值法通过对边缘^[5,6]、运动^[7]、内容^[8]等不同场景的检测来自动切换或调整不同的滤波器结构或参数,以削弱模糊和混叠效应。这类方法的优点是能够实现对边缘的保护,保持图像的锐利度,或者能够在静止区域增加垂直分辨率,消除运动区域的羽化现象,缺点是由于边缘、运动、内容等的检测失误会带来插值错误等缺陷。目前比较适用的去隔行算法是多个算法的融合,吸收多个算法的优点,取长补短,以取得更好的处理效果和更优化的结构。

本文提出一种基于增强型边缘定向插值的运动自适应算法,主要包括空间加权边缘搜索、边缘定向插值、同极性场间的运动检测和运动自适应插值等,能够很好地实现对运动和复杂纹理边缘的检测,并且通过增强的边缘定向和运动自适应插值实现去隔行处理,取得良好的处理效果。

1 增强型边缘方向定向插值

传统的边缘自适应去隔行算法主要存在两类问题:(1)边缘搜索和插值运算时容易受到噪声干扰;(2)在处理图像的细节丰富区域时容易产生插值错误。为克服这两个缺陷,本文提出了增强型边缘定向插值算法,主要从边缘像素判断、插值方向预测和边缘自适应插值三个方面改善插值性能。

1.1 边缘像素判断

边缘像素判断的作用是预先判断当前待插值点是否位于边缘上,这样就筛选掉了不参与边缘自适应插值的像素点,有效地抑制了伪边缘插值。具体步骤是:

(1)计算当前待插补像素 $P(i, j)$ 的左偏方向上对应块的绝对差值和(sum of absolute difference in left, SDL)、右偏方向上对应块的绝对差值和(sum of absolute difference in right, SDR)、垂直方向对应块的绝对差值和(vertical sum of absolute difference, SDV),计算公式是:

① 863 计划(2009AA011706)资助项目。

② 男,1974 年生,博士,高级工程师;研究方向:数字视频处理,SoC 设计;联系人,E-mail: dingy@vlsi.zju.edu.cn
(收稿日期:2009-11-04)

$$\begin{aligned}
SDL &= \sum_{k=-a}^a |p(i-1, j-1+k) \\
&\quad - p(i+1, j+1+k)| \\
SDR &= \sum_{k=-a}^a |p(i-1, j+1+k) \\
&\quad - p(i+1, j-1+k)| \\
SDV &= \sum_{k=-a}^a |p(i-1, j+k) \\
&\quad - p(i+1, j+k)|
\end{aligned} \quad (1)$$

其中, a 为预先设置的参数, 表征的是参加左偏方向(L)、右偏方向(R)和垂直方向(V)评估的像素点数, 且 $a \geq 0$ 。 a 越大, 参与判断的像素点越多, 判断的准确率越高, 但相应的运算复杂度也会提高。经过实验评估, 本文采用 $a = 1$ 。图1为 $a = 1$ 的 SDL 、 SDR 、 SDV 计算示意图。

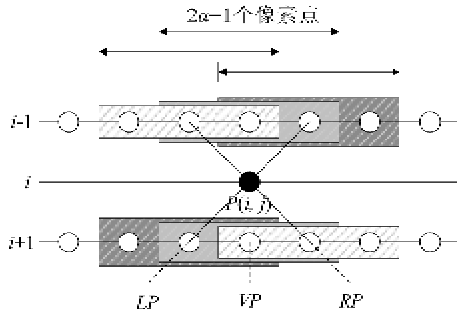


图1 边缘像素判断示意图

(2)通过比较 SDL 、 SDR 和 SDV , 判断当前待插值点是否位于边缘上。采用参数“ $EDGE$ ”表征当前待插补像素是否在边缘上。判断的准则为:

$$EDGE = \begin{cases} 0 & SDL < SDV, SDR < SDV \\ 0 & SDL > SDV, SDR > SDV \\ 1 & \text{其他} \end{cases} \quad (2)$$

如果 $EDGE = 0$, 认为当前待插补像素不在边缘上, 将退出边缘定向插值; 如果 $EDGE = 1$, 则认为在边缘方向上, 将进行边缘定向插值。

1.2 插值方向预测

引入边缘方向值“ $DIRECTION$ ”的概念进行插值边缘方向的大致判断。 $DIRECTION$ 表征的是当前待插值点边沿的大致方向: 向左($Left$)、向右($Right$)或垂直($Vertical$)。通过预先对插值方向的判断, 可以有效地消除反向插值错误的产生, 并使得后续的加权边缘方向评估和边缘方向搜索的计算量减少一半。

对于待插补像素 $P(i, j)$, 插值边缘方向预测的计算示意如图2所示, $DIRECTION$ 的计算如下:

$$\begin{aligned}
L &= |p(i-1, j) - p(i+1, j+1)| \\
&\quad + |p(i-1, j-1) - p(i+1, j)| \\
R &= |p(i-1, j) - p(i+1, j-1)| \\
&\quad + |p(i-1, j+1) - p(i+1, j)|
\end{aligned} \quad (3)$$

$DIRECTION =$

$$\begin{cases} Vertical & |L - R| < T_edge \\ Left & |L - R| > T_edge \& (L - R) < 0 \\ Right & |L - R| > T_edge \& (L - R) > 0 \end{cases} \quad (4)$$

其中, T_edge 为预先设定的阈值。

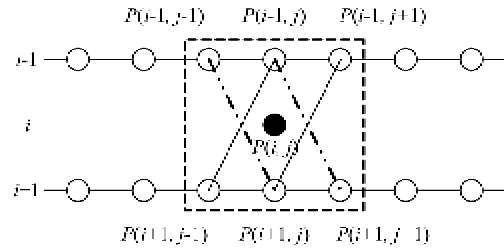


图2 插值方向预测示意图

1.3 边缘搜索与定向插值

经过插值方向预测后, 获得了待插补像素 $P(i, j)$ 所在边缘的大致方向, 需要进一步的检测以确定精确的边缘方向。假如插值方向预测得到 $DIRECTION = Left$, 则需要在左方向上对小角度边缘进行进一步的搜索。为了防止噪声点对边缘搜索带来的影响, 通过比较上下两行上对应的 $2\gamma + 1$ 像素块的相关性来消除。小角度边缘搜索示意图如图3所示。另一方面, 在传统边缘自适应插值方法

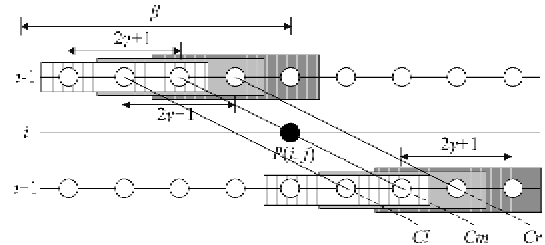


图3 小角度边缘搜索示意图

上下行单边缘像素相关性比较的基础上, 增加同一方向上相邻两条边缘的像素相关性比较, 进一步提高边缘方向的检测精度。具体步骤是:

(1)边缘方向像素相关性计算

同一边缘方向上 3 个边缘对应像素块相关性可以表示为

$$\begin{aligned} Cl(k) &= \sum_{i=-\gamma}^{\gamma} |p(i-1, j-1+k+l) \\ &\quad - p(i+1, j-1-k+l)| \\ Cr(k) &= \sum_{i=-\gamma}^{\gamma} |p(i-1, j+1+k+l) \\ &\quad - p(i+1, j+1-k+l)| \\ Cm(k) &= \sum_{i=-\gamma}^{\gamma} |p(i-1, j+k+l) \\ &\quad - p(i+1, j-k+l)| \end{aligned} \quad (5)$$

其中, k 为搜索的边缘方向, $0 < k < \beta$, β 为预先设置的参数, 表征的边沿搜索的范围, 随着 β 的增大, 边缘方向的搜索更加准确; Cl , Cr 和 Cm 分别是左边沿、右边沿和中边沿上 $2\gamma+1$ 像素块的相关性; γ 为预先定义的参数, 表征的是参与边缘方向评估的像素点数。随着 γ 的增大, 对噪声影响的抑制越明显, 但是计算量越大也相应增大, 本文选取 $\gamma = 1$ 。

(2) 加权边缘方向评估

对 $Cl(k)$ 、 $Cr(k)$ 和 $Cm(k)$ 进行中值滤波, 可以得到边缘方向相关性函数 (correlation function of edge direction, CFE):

$$CFE(k) = \text{median}(Cl(k), Cr(k), Cm(k)) \quad (6)$$

在边缘搜索过程中, k 值越大, 点 $P(i-1, j+k)$ 、点 $P(i+1, j-k)$ 和当前待插值点 $P(i, j)$ 的距离会越远, 它们之间的相关性也会越小, 容易引入错误的插值, 所以构造边缘加权拟合函数 $f(k)$:

$$\begin{aligned} f(k) &= MID(k) + \alpha_1 |k| + \alpha_2 |k|^2 + \dots \\ &\quad + \alpha_n |k|^n \end{aligned} \quad (7)$$

其中, $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n$ 为多项式系数。 $\alpha_1 |k| + \alpha_2 |k|^2 + \dots + \alpha_n |k|^n$ 的项数越多, 对边缘方向评估实际情况的拟合会越好, 但相应地, 也会提高算法的复杂度。根据实验的结果, 本文采用 $\alpha_n = 0.8 (n = 1)$, $\alpha_n = 0 (n > 1)$ 。

在边缘搜索时, 采用 $f(k)$ 作为边缘检测的指标, 搜索得到的最小 $f(k)$ 对应的 k , 就是经过待插补像素的边缘的方向。由于 $f(k)$ 中增加了一个多项式, 随着 k 的增加, 边沿拟合函数 $f(k)$ 也会相应增加一个系数, 从而抑制了 k 增加所带来错误边缘定向插值的可能性。

另外, 在逐一比较边缘加权拟合函数 $f(k)$ 的过程中, 采取提前终止的方法, 即随着 k 从 0 增加到 β , 如果 $f(k)$ 从递减变为递增, 则认为检测到相应

的边缘, 提前终止边缘检测进程。提前终止方法比单纯从所有 $f(k)$ 中找出最小值对应的 k 进行插值的优点在于: ①消除了跨边沿错误插值的可能性, 如 $f(k)$ 反复递增、递减的情况; ②减小了计算量, 提高运算速度。

(3) 边缘定向插值

在最终获得的边缘方向 k 上进行定向插值, 得到待插补像素的灰度值:

$$P(i, j) = (P(i-1, j+k) + P(i+1, j-k))/2 \quad (8)$$

2 运动自适应插值

2.1 运动检测

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检测, 并按照运动检测的结果将视频图像划分为运动或静止区域, 从而采取相应的插值处理技术。

模拟视频信号按照“奇偶奇偶奇偶奇偶……”的场次序依次传输, 每隔一场极性相同。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^[9]。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检测。SAD 定义为

$$\begin{aligned} SAD(i, j; t-1) &= \sum_{k=-m}^m \sum_{l=-n}^n |X(i+k, j+l; t) \\ &\quad - X(i+k, j+l; t-2)| \end{aligned} \quad (9)$$

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。 $X(i, j; t-1)$ 为像素块的中心像素 (当前处理像素) 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 $X(i+k, j+l; t-2)$ 分别为第 t 和 $t-2$ 场图像的像素灰度值, $t-1$ 和 $t-2$ 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 、 SAD_U 和 SAD_V , 公式为

$$\begin{aligned} SAD_Y(i, j; t-1) &= \sum_{k=-2}^2 \sum_{l=-1}^1 |Y(i+k, j+l; t) \\ &\quad - Y(i+k, j+l; t-2)| \\ SAD_U(i, j; t-1) &= \sum_{k=-2}^2 \sum_{l=-1}^1 |U(i+k, j+l; t) \\ &\quad - U(i+k, j+l; t-2)| \\ SAD_V(i, j; t-1) &= \sum_{k=-2}^2 \sum_{l=-1}^1 |V(i+k, j+l; t) \\ &\quad - V(i+k, j+l; t-2)| \end{aligned} \quad (10)$$

然后将 Y 和 UV 通道上的 SAD_Y 、 SAD_U 和 SAD_V 求和得到当前像素总 SAD, 即

$$SAD = SAD_Y + SAD_U + SAD_V \quad (11)$$

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

$$MI(i, j; t) = (SAD > T_{motion}) \quad (12)$$

其中, T_{motion} 由 MCU 通过 i^2c 进行配置, 在实验中选择 $T_{motion} = 50$ 。

2.2 运动自适应插值

对于运动检测得到的运动信息 $MI(i, j; t) = 0$ 的区域, 即静止区域, 采用场合并(merge)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; 对于运动信息 $MI(i, j; t) = 1$ 的区域, 即运动区域, 采用前述的边缘定向插值, 如式(8)所示。所以, 待插补像素可以表示为

$$P^*(i, j; t) = \begin{cases} (P(i-1, j+k) + P(i+1, j-k))/2 & MI(i, j; t) = 1 \\ P(i, j; t-1) & MI(i, j; t) = 0 \end{cases} \quad (13)$$

更进一步, 为了消除插值后的灰度值与上下行的垂直相邻像素相差太过悬殊引起的图像突兀变化和点闪烁现象, 需要对当前场像素点 $P(i-1, j; t)$, $P(i+1, j; t)$ 和待插补像素值 $P^*(i, j; t)$ 进行中值滤波处理, 得到最终的插补像素 $P(i, j; t)$, 即

$$P(i, j; t) = \text{median}(P(i-1, j; t), P(i+1, j; t), P^*(i, j; t)) \quad (14)$$

综上所述, 基于增强型边缘定向插值的运动自适应去隔行算法的流程图如图 4 所示。

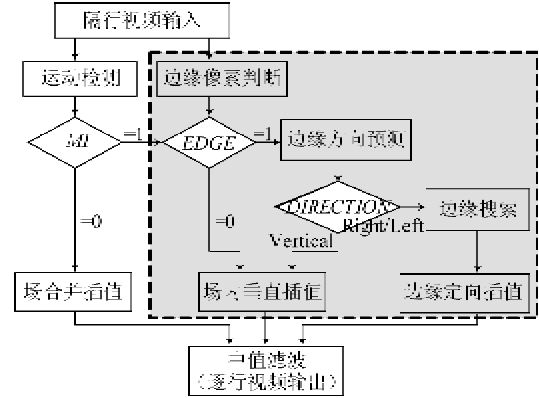


图 4 基于增强型边缘定向插值的运动自适应去隔行流程图

3 实验结果及分析

3.1 场内边缘定向插值性能评估

为评估对图像边缘的插值效果, 在实验中比较了本文算法与各种传统场内插值算法的 PSNR(峰值信噪比), 参与比较的场内插值算法包括 LA^[1]、ELA^[10]、STW^[11] 和 DOI^[12]。用于测试的图像包括 Baboon、Barbara、Boat、Airplane、Lena、Man、Pepper、Mandrill 和 Tiffany 等。比较结果如表 1 所示。从表 1 可以看出, 本文提出算法在 PSNR 指标方面优于传统的场内插值算法。

表 1 与传统去隔行算法的 PSNR 比较(单位: dB)

	LA	ELA	STW	DOI	Proposed
Baboon	23.50	22.97	22.95	23.51	23.67
Barbara	32.13	25.12	25.14	29.59	31.14
Boat	34.85	32.35	32.64	34.66	34.79
Airplane	31.87	31.12	30.92	31.89	32.07
Lena	37.67	35.99	35.87	38.00	38.15
Man	31.98	30.83	31.11	32.03	32.40
Pepper	33.76	34.05	33.89	33.93	34.22
Mandrill	21.62	22.98	22.95	23.18	23.48
Tiffany	29.52	30.22	30.20	30.47	30.69

图 5 是各种场内插值算法对 Barbara 测试图像场内插值的截图主观效果比较。其中, (a) 为原图, (b) 为 LA 处理效果图, (c) 为 ELA 处理效果图, (d) 为 DOI 处理效果图, (e) 为 STW 处理效果图, (f) 为本文提出的边缘定向插值算法处理效果图。从图 5 可以看出, ELA、STW、DOI 这三种基于边缘插值的去隔行算法在处理 Barbara 中的细小纹理等区域时发生

了大量的插值错误,而本文提出的算法有效抑制了 这些插值错误,保持了纹理边缘的连续性。

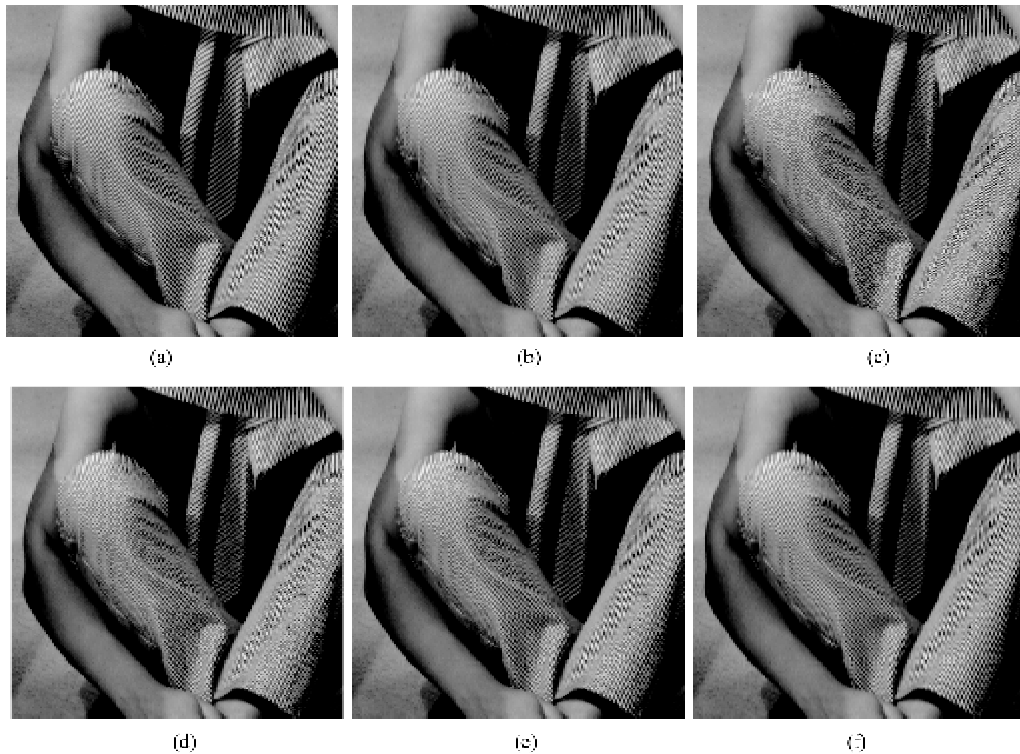


图 5 各种场内插值算法处理效果比较

3.2 运动自适应去隔行性能评估

为评估算法对视频流的运动自适应去隔行效果,在实验中采用了 Foreman, Silent, Flower, Mobile 等视频序列的 300 帧图像进行了测试。参与比较的传统去隔行算法包括 merge、LA^[1]、ELA^[10]、DOI^[11]和 AELA^[5]。各种去隔行算法处理 300 帧视频流的平均 PSNR 比较结果如表 2 所示。

表 2 各种去隔行算法的平均 PSNR 比较(300 帧,单位: dB)

	merge	LA	ELA	AELA	DOI	Proposed
Foreman	28.634	33.507	33.681	34.048	34.258	34.712
Flower	20.618	22.582	21.764	21.722	21.744	22.425
Mobile	23.346	25.580	23.472	23.566	23.707	25.297
Silent	34.173	40.775	39.773	39.933	40.159	41.017

从表 2 可以看出,本文提出的算法在处理 Mobile 和 Flower 时平均 PSNR 略低于 LA 算法,这是由于 Mobile 和 Flower 画面中存在大量无规则信息,并不适合采用基于边缘插值的方法进行去隔行处理。在其余情况下,本文算法的平均 PSNR 要优于传统的去隔行算法,如相比 DOI 算法,本文算法的 PSNR 值提高了 0.43dB 以上。

本文算法和传统算法处理 Foreman、Silent 每帧

图像的 PSNR 值(300 帧)比较分别如图 6 和图 7 所示。从图 6、图 7 可以看出,本文提出的边缘定向运动自适应去隔行算法在处理 Flower、Foreman 每一帧图像时的 PSNR 值总体上优于其他传统算法的处理效果。

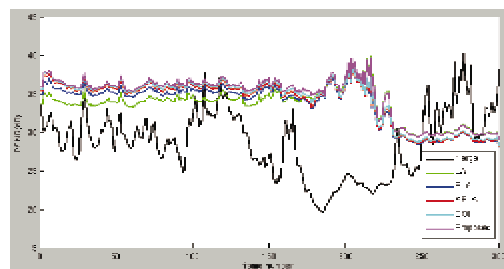


图 6 处理 300 帧 Foreman 视频序列的各种算法 PSNR 比较

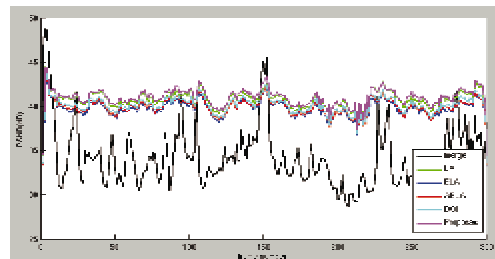


图 7 处理 300 帧 Silent 视频序列的各种算法 PSNR 比较

4 结 论

针对边缘搜索和插值过程中易受到噪声影响,以及在处理图像细节丰富区域时易产生插值错误,本文提出了一种基于加权的边缘搜索和定向插值的增强型运动自适应去隔行算法。实验结果表明,此算法有效地改善了去隔行性能,取得良好的图像画质,并且,由于采用了提前终止、边缘方向预判断等技术,大大减少了计算量。

参考文献

- [1] Thomas G. A comparison of motion-compensated interlace-to-progressive conversion methods. *Signal Processing: Image Communication*, 1998, 12: 209-229
- [2] Fan Y C. Deinterlacing system and technology overview and discussion. In: Proceedings of the 2009 IEEE International Workshop on Imaging Systems and Techniques (IST '09), Shenzhen, China, 2009. 287-290
- [3] Chung C H, Liang C C, Fan Y C, et al. Correction to novel artifact detection for motion compensated deinterlacing. In: Proceedings of the 2009 IEEE International Symposium on Industrial Electronics (ISIE 2009), Seoul, Korea, 2009. 1337-1340
- [4] Chen Y R, Tai S C. True motion-compensated de-Interlacing algorithm. *IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology*, 2009, 19(10):1489-1498
- [5] Chang Y L, Lin S F, Chen L G. Extended intelligent edge based line average with its implementation and test method. In: Proceedings of the International Symposium on Circuits and Systems, Vancouver, Canada, 2004. 341-344
- [6] Lai R L, Chen B H, Lee G G, et al. Algorithm and architecture design for wide range ELA deinterlacer. In: Proceedings of the 2009 IEEE International Symposium on Circuits and Systems (ISCAS 2009), Taipei, Taiwan, China, 2009. 2365-2368
- [7] Sun H B, Zheng N N, Ge C Y, et al. An efficient motion adaptive de-interlacing and its VLSI architecture design. In: Proceedings of the 2008 IEEE Computer Society Annual Symposium on VLSI (ISVLSI '08), Montpellier, France, 2008. 455-458
- [8] Kang K, Kim J, Jeong J. Video sequence deinterlacing using intensity gradient filter and median filter with texture detection. In: Proceedings of the 1st International Conference on Advances in Multimedia (MMEDIA '09), Colmar, France, 2009. 23-28
- [9] Chang Y L, Lin S F, Chen C Y, et al. 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
- [10] Doyle T. Interlaced to sequential conversion for EDTV applications. In: Proceedings of the 2nd International Workshop on Signal Processing of HDTV, New York, USA, 1988. 412-430
- [11] 丁勇, 陆生礼, 时龙兴. 时空权重和边缘自适应去隔行. *计算机学报*, 2007, 30(4):655-660
- [12] Yoo H, Jeong J. Direction-oriented interpolation and its application to de-interlacing. *IEEE Transactions on Consumer Electronics*, 2002, 48(4):954-962

Motion adaptive de-interlace with enhanced edge oriented interpolation

Ding Yong, Ma Bin

(Institute of VLSI Design, Zhejiang University, Hangzhou 310027)

Abstract

To implement the high quality scanning format conversion from interlaced images to progressive images, a novel motion adaptive de-interlacing algorithm with enhanced edge directed interpolation is proposed in this paper. It consists of the techniques of spacial weighted edge search, edge directed interpolation, same-parity inter-field motion detection, and motion adaptive interpolation. Compared with the previous algorithms, in the proposed algorithm, the weighted edge search is introduced to remarkably reduce the false edge interpolation, the prejudgment of edge direction is added to suppress the reversal interpolation error, the early termination is considered to reduce the calculation, and the same-parity inter-field motion detection is used to improve the accuracy of motion information. The extensive experiments show the efficacy of the proposed algorithm outperforms the previous algorithms in terms of the objective and subjective image quality.

Key words: de-interlace, motion adaptive, edge detection, edge oriented