

基于加权运动估计和矢量分割的运动补偿内插算法

鲁志红¹ 郭丹¹ 汪萌¹

摘 要 提出了一种基于加权运动估计、矢量分割和可变块层次化处理的运动补偿内插 (Motion-compensated frame interpolation, MCFI) 算法. 首先, 提出一种加权运动估计改善了运动矢量 (Motion vector, MV) 的准确度, 其次, 通过矢量聚类分割将视频帧分割为运动区域和背景, 然后对运动区域的运动矢量进行了可变块层次化处理. 此过程中, 采用可变块合并算法保证了运动物体的边缘结构信息不被损坏. 同时考虑到部分可变块的多方向性, 使用了自适应矢量中值滤波器和矢量平滑降低了运动块大小, 能有效地消除传统方法中出现的方块效应和重影现象. 实验结果表明该算法在内插图像的主观视觉效果和客观评估标准上都有所提高, 而且对于运动较快及背景较复杂的视频序列同样具有较强的适应性.

关键词 加权运动估计, 运动矢量分割, 可变块处理, 运动补偿内插

引用格式 鲁志红, 郭丹, 汪萌. 基于加权运动估计和矢量分割的运动补偿内插算法. 自动化学报, 2015, 41(5): 1034–1041

DOI 10.16383/j.aas.2015.c140686

Motion-compensated Frame Interpolation Based on Weighted Motion Estimation and Vector Segmentation

LU Zhi-Hong¹ GUO Dan¹ WANG Meng¹

Abstract In this paper, an algorithm of motion-compensated frame interpolation is proposed based on weighted motion estimation, motion vector (MV) segmentation and variable block processing (MCFI). First, we present the weighted motion estimation method to obtain more accurate motion vectors. Next, we partition a frame into moving areas and background by clustering the received motion vectors. Then, a variable block processing method is applied to the moving areas, which can protect the moving areas' edge structures from being damaged. Meanwhile, considering multiple directions of the motion blocks, we adopt adaptive vector median filter and motion vector smoothing to refine the block size to effectively eliminate the blocking artifacts and ghost effects. Experiment shows that the algorithm not only improves the image quality both subjectively and objectively, but also has a better adaptability to video sequences with fast motion and complex background.

Key words Weighted motion estimation, motion vector (MV) segmentation, variable block processing, motion-compensated frame interpolation (MCFI)

Citation Lu Zhi-Hong, Guo Dan, Wang Meng. Motion-compensated frame interpolation based on weighted motion estimation and vector segmentation. *Acta Automatica Sinica*, 2015, 41(5): 1034–1041

随着高清数字电视和多媒体信息系统的迅猛发展, 如何提高视频源的帧率以满足人们高质量的视觉享受, 激起了国内外学者的广泛关注. 近年来, 帧率上转换 (Frame rate up conversation, FRUC) 作为一种实现不同帧率扫描格式转换的后处理技术, 成为了人们研究的热点.

实现 FRUC 的常用算法有帧重复、帧平均等^[1–4]. 这些方法在场景静止或运动不大时能够得到较好的视觉效果, 但在场景运动较大时, 则会出现模糊或抖动. 运动补偿内插 (Motion-compensated frame interpolation, MCFI) 是目前实现 FRUC 另外一种效果较好且比较广泛的算法^[1]. MCFI 是通过运动物体的运动矢量 (Motion vector, MV) 来估计该物体在内插图像中的位置. 由于在解码器端, 运动矢量场 (Motion vector field, MVF) 是通过使对应块之间的绝对误差和 (Sum of absolute difference, SAD) 最小获得的. 因此, 常常无法保证 MVF 的真实性, 不正确的 MV 容易使内插帧产生方块效应和重影现象.

为了得到较为真实的 MVF, 人们做了大量研究工作. 主要可以分为三类: 第一类是调整运动估计的计算方法. 如: Ha 等提出了重叠块运动估计的方

收稿日期 2014-09-15 录用日期 2014-12-11
Manuscript received September 15, 2014; accepted December 11, 2014

国家自然科学基金 (61305062), 中国博士后科学基金 (2012M511403), 安徽省自然科学基金 (1308085QF102) 资助
Supported by National Natural Science Foundation of China (61305062), China Postdoctoral Science Foundation (2012M511403), and Natural Science Foundation of Anhui Province (1308085QF102)

本文责任编辑 黄庆明
Recommended by Associate Editor HUANG Qing-Ming

1. 合肥工业大学计算与信息学院 合肥 230009

1. School of Computer and Information, Hefei University of Technology, Hefei 230009

法以得到更准确的 MVF^[5], 但增加了计算的复杂度. 文献 [6] 提出了一种可变分块尺寸的多模板运动估计算法. 文献 [7-8] 则以重构帧为主体提出了一种双向运动估计方法, 然而该方法易得到错误的 MVs, 特别对运动较快的视频序列. 第二类是调整对运动估计获得的 MVF 处理方法. 如: Alparone 等提出了自适应矢量中值滤波 (Adaptive vector median filter, AVMF) 对初始 MVF 进行处理^[9], 这种方法在消除异常值时是有效的, 但缺点在于可能会修正过多的 MV, 甚至导致更多的异常 MV. 随后, Dane 等提出了平滑 MV 的方法以降低方块效应^[10], 但是该方法可能会出现较为严重的重影. 文献 [11] 给出了一种三角滤波的方法去纠正不可靠的像素和恢复丢失的像素. 第三类则是调整了中间帧的插帧方法. 如: 文献 [12] 提出了一种小波系数的运动补偿算法. 文献 [13-14] 通过仿射变换来内插中间帧, 但该方法在图像具有重复的纹理时将无法解决. 文献 [15-16] 使用重叠块运动补偿的方法来降低方块效应, 但是当所有块都使用重叠块运动补偿时, 图像又会变得模糊.

针对上述方法存在的问题, 本文提出了一种基于加权运动估计、聚类分割和可变块层次化处理相结合的 MCFI 算法. 首先, 为了提高获得初始 MVF 的准确度, 同时考虑到邻近块之间相关性, 提出了一种加权运动估计的方法. 其次, 不可靠的 MVs 大多存在于视频序列的运动区域中, 因而有必要对视频帧进行聚类分割以便分类处理. 对复杂的运动区域, 本文采用了一种层次化的可变块处理方法, 它包含块合并、自适应滤波和平滑三个过程. 采用块合并算法保证了运动物体的边缘结构信息不会因为块的分割被损坏, 并从周围领域中选择合适的 MV 作为该合并块的 MV. 除此之外, 考虑到部分边缘块是多个运动物体的组合, 具有多向性, 需要对其进行不断的细化. 本文使用了自适应矢量中值滤波 (AVMF) 的方法和平滑操作, 进一步调整块大小获得更为详细的运动信息. 本文算法不仅提出了加权思想修正运动估计, 又通过聚类分割和可变块层次化处理降低了优化 MV 的计算复杂度. 实验结果验证了这两部分的有效性, 并且很好地解决了传统 MCFI 出现的方块效应和重影现象, 在内插图像的视觉效果和客观评估标准上都有所提高, 即使针对运动较快及复杂背景的视频序列也具有较强的适应性.

1 本文算法

图 1 给出了本文算法整体结构框图. 主要由 4 个模块组成, 首先是加权运动估计; 其次是通过聚类分割将视频帧划分为运动区域和背景区域; 然后对运动区域中不可靠的 MVs 进行可变块的层次化处

理; 最后是双向运动补偿.

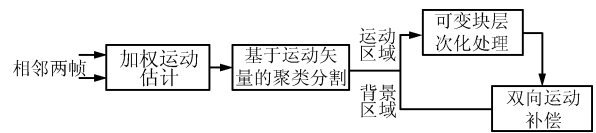


图 1 算法结构框图

Fig. 1 Block diagram for the algorithm

1.1 加权运动估计

运动估计是本文 MCFI 的第一步. 传统的运动估计方法采用块匹配算法, 它将视频帧分成若干个运动块 (Motion block, MB), 获取 MVs 是通过使相邻帧对应块的 SAD 达到最小, SAD 计算如下:

$$SAD = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n |f_{t+1}(i, j) - f_{t-1}(i + v_x, j + v_y)| \quad (1)$$

这里 m 和 n 为 MB 的宽和高, f_{t-1} 和 f_{t+1} 为输入的相邻两帧, $v = (v_x, v_y)$ 是相应的运动矢量.

但是 SAD 达到最小, 并不代表获得了真实的 MVs, 因此无法反映物体的真实运动轨迹. 块匹配算法将视频帧进行分割易产生方块效应, 此时若将邻近块之间的相关性考虑在内, 必将对初始 MVF 准确性有一定的提升. 本文使用边界绝对误差和 (Boundary of absolute difference, BAD)^[16] 作为邻近块之间的一种度量, 并提出了一种新的加权测量标准. 该加权测量标准可以计算如下:

$$v_{i,j} = \arg \min_v (SAD(v) + \mu \times BAD(v)) \quad (2)$$

这里 μ 是加权系数, 用于控制 SAD 和 BAD 的权重. BAD 算子的引入, 有效地改善了 MV 计算由于邻近块分割造成的方块效应. 实验结果表明当 $\mu = 0.2$ 时, 内插帧能够取得较好的视觉效果. 此外, MB 通常被设置为 16 像素 $\times$ 16 像素大小.

1.2 矢量聚类分割

尽管加权测量标准可以提高 MVs 的准确性, 但是不能保证所有的 MVs 都是可靠的. 同时, 为了获得更详细的运动信息, 此处将 16 像素 $\times$ 16 像素大小的 MB 分割成 4 个 8 像素 $\times$ 8 像素大小的子块, 它们与该 MB 具有相同的 MV. 通常在视频序列中具有多个不同的运动区域和背景区域, 而视频帧中不可靠的 MVs 大多都存在于运动区域中, 因此本文采用改进的 k -means 算法^[2-3] 对视频帧进行分割. MV 反映一个块的运动轨迹, 具有方向性和大小性. 如图 2(a) 所示, 每个子块中用带有方向的箭头表示 MV (长度为大小, 箭头为方向), 黑点则表示

该子块为静止的背景, MV 为 (0, 0). 因此本文依据聚类算法对相似对象具有聚簇的特点, 采用改进的 *k*-means 算法^[2-3] 将视频帧分割为运动区域和背景区域.

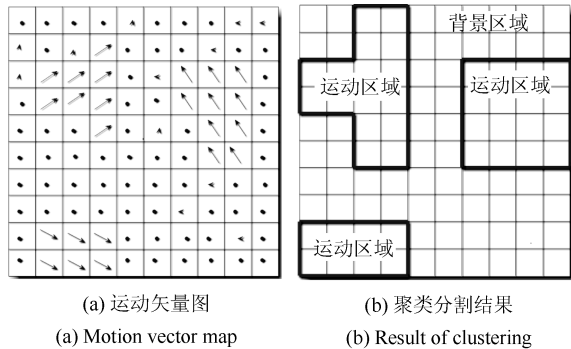


图 2 聚类分割

Fig. 2 Clustering segmentation

算法描述如下:

步骤 1. 每个子块 MV 被当作单一对象, 所有子块和的均值作为初始的聚类中心值. 本文选用 8 像素 × 8 像素为子块大小.

步骤 2. 分别计算每个子块 MV 到初始聚类中心的距离:

$$d_i = \|V_i - V_m\|_2 \quad (3)$$

其中, V_i 是视频帧中第 i 个子块的 MV, V_m 为聚类中心. 如果距离大于初始设定的阈值 e_1 , 则会产生一个新的聚类中心, 其值为所有距离大于阈值 e_1 子块的均值.

步骤 3. 将每个子块归到距离最短的中心所在的类, 并用均值更新每个类的中心值. 这样属于同一类的子块表示同一物体的运动轨迹, 因此这些子块是邻近且相似的, 如图 2(a) 所示.

步骤 4. 对于所有的聚类中心, 如果用步骤 2 和 3 的迭代法更新后, 值保持不变, 则迭代结束; 否则继续迭代.

迭代的结果如图 2(b) 所示, 具有相似 MV 的子块被划分到了同一区域中. 只要 4 个子块中有一个被划分到运动区域, 那么该 MB 也将被考虑为运动区域. 该视频帧最终被分割为三个运动区域和背景区域.

1.3 可变块处理

将视频帧分割为运动区域和背景区域后, 由于运动区域较为复杂, MV 大多为不可靠的, 因此本文采用了一种层次化的可变块处理方法针对运动区域进行优化求解. 它包含块合并、自适应滤波和平滑三个过程, 图 3 为可变块处理的流程图.

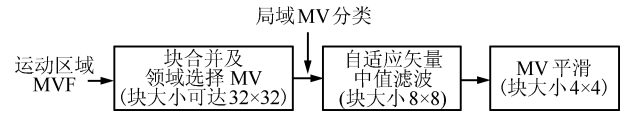


图 3 可变块处理流程图

Fig. 3 Flow chart of the variable block processing

为了保证不同运动物体的边缘结构信息不被损坏, 采用块合并算法^[17], 并从周围领域中选择 MV 作为合并块的 MV, 此时合并块大小最大可达 32×32 . 块合并处理后, 部分块的 MV 已经变得可靠, 能够反映对应块的运动轨迹了, 此时需采用局部 MV 分类对其进行标识以分类处理. 为了获取部分边缘块多方向的运动信息, 本文选择 8×8 作为局部 MV 分类的子块大小. 局部 MV 分类后不可靠的块并不能真实地反映运动物体的运动轨迹, 容易产生方块效应, 因此本文采用自适应矢量中值滤波 (AVMF) 方法进行重新计算. 最后, 对滤波处理后仍然存在不可信的区域, 本文采用平滑处理可以进一步降低块的大小 (4×4) 从而获得更为详细的运动信息. 经过可变块处理流程, 运动区域的 MVF 将能够更真实地反映运动物体的运动轨迹.

1.3.1 块合并及选择 MV

块合并是可变块处理的第一步. 由于 MV 是通过块匹配算法获得的, 因此运动物体的边缘结构信息很容易因为块分割而被损坏, 此时需要对原 MB 进行块合并. 本文采用块合并算法^[17]. 块合并原则为当该 MB 的右、下和右下这三个方向的 MB 都为运动区域块时, 就对其进行块合并, 合并块大小最高可达 32×32 . 如果该块的三个方向的 MB 都为背景, 则该块大小仍为 16×16 .

块合并处理后, 需要为合并块计算新的 MV. 本文采用从其领域块内选择最佳 v_b^* . 最佳 v_b^* 是使双向预测误差绝对值 (Absolute bidirectional prediction difference, ABPD) 达到最小^[17]. 式 (4) 如下:

$$v_b^* = \arg \min_{v \in S} (\text{ABPD}(v)) \quad (4)$$

这里

$$\text{ABPD}(v) = \sum_{i,j \in G} \left| f_{t-1} \left(i + \frac{1}{2}v_x, j + \frac{1}{2}v_y \right) - f_{t-1} \left(i - \frac{1}{2}v_x, j - \frac{1}{2}v_y \right) \right| \quad (5)$$

其中, S 为领域块 MV 的集合, G 为合并块. 设置阈值 e_2 , 在得到最佳 v_b^* 后, 检查式 (5) 是否小于给定的阈值 e_2 . 如果小于 e_2 , 则将最佳 v_b^* 作为合并块的 MV; 否则, 继续迭代, 直到所有块的 MVs 不再变化为止.

1.3.2 自适应矢量中值滤波 (AVMF)

块合并算法通过增加块大小保证运动物体边缘结构信息的完整性, 但当该块为多个物体的运动组合时, 合并块的 MV 将不能代表其真实的运动轨迹, 因此本文采用自适应矢量中值滤波 (AVMF) 的方法重新计算. 然而, 合并块选择新的 MV 后, 部分块已经变得可靠了, 此时如果再对全部运动区域块进行 AVMF, 不仅会导致计算结果的不准确, 还会增加计算的复杂度. 因此在 AVMF 前有必要采用局域 MV 分类来标识运动区域中块是否可靠. 为降低块大小以获得更详细的运动信息, 此处本文选择 8×8 子块来获取.

局域 MV 分类通过比较双向预测误差 (Bidirectional prediction difference, BPD)^[17] 与初始阈值 $e3$ 来判断 8×8 子块是否可靠. 由于色彩分量在判断 MV 可靠性时也非常重要^[17], 因此本文也考虑了图像的色彩分量. 双向预测误差计算如下:

$$\text{BPD}_{m,n} = \text{BPD}_{m,n}^Y + \alpha(\text{BPD}_{m,n}^{Cb} + \text{BPD}_{m,n}^{Cr}) \quad (6)$$

其中, $\text{BPD}_{m,n}^Y$ 、 $\text{BPD}_{m,n}^{Cb}$ 和 $\text{BPD}_{m,n}^{Cr}$ 分别代表亮度和色彩分量, α 为色彩分量所占的权重系数. 此时如果 $\text{BPD}_{m,n}$ 大于阈值 $e3$, 则该子块为不可靠的; 否则, 为可靠的.

局域 MV 分类后, 不可靠的块并不能真实地反映运动物体的运动轨迹, 因此很容易产生方块效应. 本文采用 AVMF 方法对其进行滤波^[9]. AVMF 描述如下:

$$\sum_{i=1}^N w_i \|v_b^* - v_i\|_2 \leq \sum_{i=1}^N w_i \|v_j - v_i\|_2 \quad (7)$$

其中, $1 \leq j \leq N$, N 等于该块 8 领域内可靠块的数目. w_i 为权重系数.

$$w_i = \frac{\text{SAD}(v_c)}{\text{SAD}(v_i)} \quad (8)$$

其中, $1 \leq i \leq N$, $\text{SAD}(v)$ 为绝对误差和, v_c 为该块未经过 AVMF 处理的 MV, v_i 为候选领域块的 MV. 图 4 为一个 AVMF 计算的结果. 一个 16×16 边缘 MB 通过局域 MV 分类后, 得到两个不可靠的 8×8 子块 (显示为灰色背景); 再经过 AVMF 计算后, 滤波后右边两个不可靠的子块也调整为可靠了. 这样的 AVMF 处理方式在保证视觉效果相差不大的前提下避免了引入额外的参数做 MV 相似性检查增加计算的复杂度.

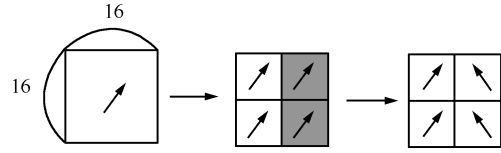


图 4 自适应矢量中值滤波 (AVMF)

Fig. 4 Adaptive vector median filter

最后, 仍需检查该块 AVMF 后的 BPD 是否小于原始 BPD 大小. 如果是, v_b^* 将作为该块的 MV; 否则保持原有的 MV, 此时该块仍为不可信的块. 不可信块将在第 1.3.3 节平滑操作中进行纠正.

1.3.3 MV 平滑

针对自适应矢量中值滤波 (AVMF) 操作后剩下的不可信块, 需对其做最后的平滑处理以进一步消除方块效应. 如图 5 所示^[10], 左图中每个 8×8 块被划分成右图中 4 个 4×4 的子块, 此时左图中只有灰色背景块 v 是不可信的, 其他领域块已经变成可信的了, 相对于初始运动区域中不可靠块数量已经是极少量的了. 因此本文的平滑操作是对少量不可信块的微调过程.

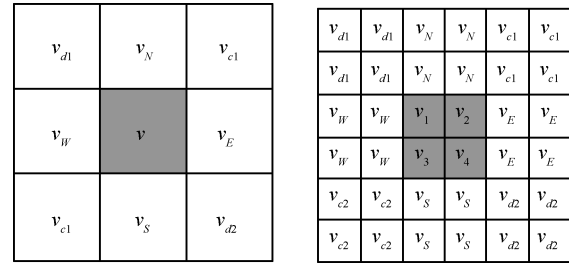


图 5 8×8 块被分成 4 个 4×4 子块

Fig. 5 8×8 block is divided into four 4×4 sub-block

文献 [10] 给出了类似的处理方法, 然而, 不同于文献 [10] 对所有的 MVs 进行平滑, 本文的平滑是对少量不可靠块的微调过程. 获取 v_1, v_2, v_3, v_4 是通过使式 (9) 达到最小^[10]. 式 (9) 如下:

$$\phi = \phi_N + \phi_S + \phi_E + \phi_W + \phi_D + \phi_C \quad (9)$$

其中, 下标 N, S, E, W, D, C 表示方向信息, 为北、南、东、西、对角线和中心方向. 比如北和西的方向计算见式 (10), 其他方向的计算依次类推.

$$\begin{aligned} \phi_N &= \|v_1 - v_N\|_2 + \|v_2 - v_N\|_2 + \\ &\quad \|v_3 - v_1\|_2 + \|v_4 - v_2\|_2 \\ \phi_W &= \|v_1 - v_W\|_2 + \|v_3 - v_W\|_2 + \\ &\quad \|v_2 - v_1\|_2 + \|v_4 - v_3\|_2 \end{aligned} \quad (10)$$

文献 [10] 虽然能有效减少方块效应, 但不可避免地引发了较为严重的重影现象, 本文的平滑处理则改善了这一点.

最后, 本文采用式 (11) 对背景区域和可变块处理后的运动区域进行运动补偿从而内插出中间帧. 式 (11) 如下:

$$f_t(i, j) = \frac{1}{2}f_{t-1}\left(i + \frac{1}{2}v_x, j + \frac{1}{2}v_y\right) + \frac{1}{2}f_{t+1}\left(i - \frac{1}{2}v_x, j - \frac{1}{2}v_y\right) \quad (11)$$

2 实验结果及分析

本文提出了加权思想修正运动估计和采用矢量分割、可变块处理对初始 MVF 进行处理以获得更精确的 MV. 实验中, 首先对加权运动估计中的参数 μ 进行分析, 并验证了这两部分的有效性. 其次将本文算法与其他实验方法进行对比. 本文选择了 Foreman、Stefan 及 Mobile 作为实验对象, 其均为 YUV 格式的 CIF 大小为 352×288 的视频序列. 算法中的其他参数 $e1$ 、 $e2$ 和 $e3$ 都是通过在一的取值区间中调优, 使客观评估标准达到最大得到的.

2.1 实验有效性分析

加权运动估计中, 参数 μ 用于控制邻近块之间相关性对初始 SAD 的影响, 实验使用 PSNR (Peak signal to noise ratio) 和 SSIM (Structure similarity index)^[18] 作为客观评估标准, 对 μ 不同取值进行分析. 为了给出不同视频序列的展示效果, 实验将 PSNR 和 SSIM 值进行了归一化处理. 如图 6 所示, 图 6(a) 和图 6(b) 分别为 3 个视频序列在 PSNR 和 SSIM 评估标准上对不同的 μ 值的对比图. 从总体上看, 当 μ 等于 0.2 时, 内插帧在三个视频序列上都具有较高的 PSNR 和 SSIM 值. 此外, 当参数 μ 等于 0 时为传统运动估计方法得到的结果, 从图 6 中可以看出, 参数 μ 等于 0.2 时的加权运动估计较其在客观评估标准上都有一定的提升.

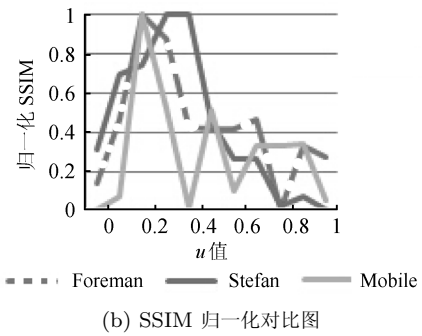
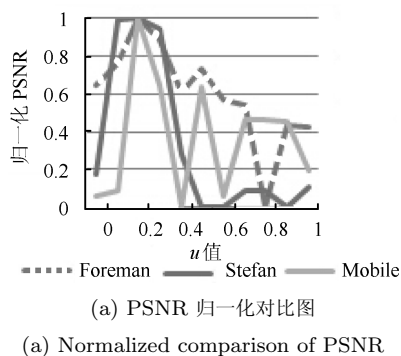


图 6 不同 μ 值所对应的归一化结果对比图

Fig. 6 Comparisons of the normalized results on different values of μ

对初始 MVF 进行处理是提高内插帧视觉效果关键步骤. 以 Foreman 序列为例, 图 7 示例了算法各模块的有效性. 图 7(b) 为加权运动估计后没有对 MV 进行任何处理的结果, 出现了方块效应. 图 7(c) 为加权运动估计后对 MVF 进行自适应矢量中值滤波 (AVMF) 的结果, 帽子边缘重影现象较为明显. 而本文所提矢量分割和可变块处理方法对其都有一定的抑制效果, 如图 7(d) 所示, 这也表明了本文算法中聚类分割和可变块处理的有效性.



图 7 Foreman 序列第 16 帧视觉效果

Fig. 7 Experiment results of frame 16 of Foreman sequence

2.2 与其他方法对比结果

本节主要对本文算法、自适应矢量中值滤波 (AVMF)、文献 [10] 所提平滑方法 (Smoothing) 和

文献 [4] 所提轻决策运动估计方法进行 MCFI 计算, 从主观视觉效果和客观评估标准上进行比对。

视觉效果如图 8~10 所示。图 8 是 Foreman 序列使用第 77 帧和 79 帧进行 MCFI 得到的第 78 帧结果。从图 8 中可以看出, 图 8(a) 和图 8(b) 在鼻子和左半边脸部分产生了较大的重影, 这是因为尽管 AVMF 和平滑方法对初始的 MVF 进行了相应处理, 但是处理后的 MV 仍然是相对不可靠的。轻决策运动估计方法即使使用多帧的方法来提高 MV 的准确度, 但它没有考虑各块之间的相关性, 因此出现了较为严重的方块效应, 如图 8(c) 所示。而图 8(d) 使用本文算法, 重影现象和方块效应都得到了明显的消除。

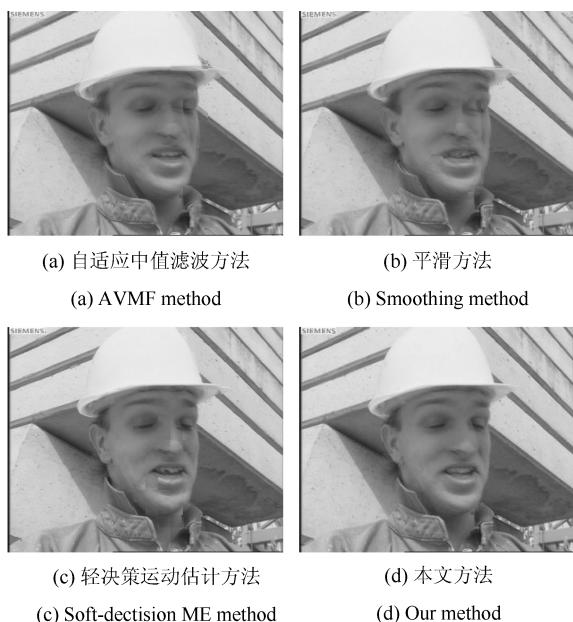


图 8 Foreman 序列第 78 帧视觉效果

Fig. 8 Experiment results of frame 78 of Foreman sequence

针对运动速度较快的 Stefan 序列, 图 9 是 Stefan 序列内插得到第 16 帧放大后的结果。从图 9 中可以看出, 图 9(a) 和图 9(b) 都产生了较严重的空洞和重叠区域, 此外, 图 9(a)~(c) 对地面白色直线的重构都出现了扭曲, 而图 9(d) 表明本文方法对上述失真现象有较好的抑制作用。这说明了本文方法对运动速度较快的视频序列也具有较佳的视觉效果。

同样, 本文还选择了背景较为复杂的 Mobile 序列进行实验对比。图 10 为 Mobile 序列第 34 帧内插的结果。图 10(a) 中日历的数字出现了重影, 图 10(b) 中重影现象不明显, 但背景相对比较模糊, 在图 10(c) 中, 日历的数字, 如 18、19 及左上角的 28 等都出现了扭曲, 而本文方法 (图 10(d)) 则弥补了这几方面的不足。这说明本文方法对于背景较为复

杂的视频序列也具有较佳的适应性。

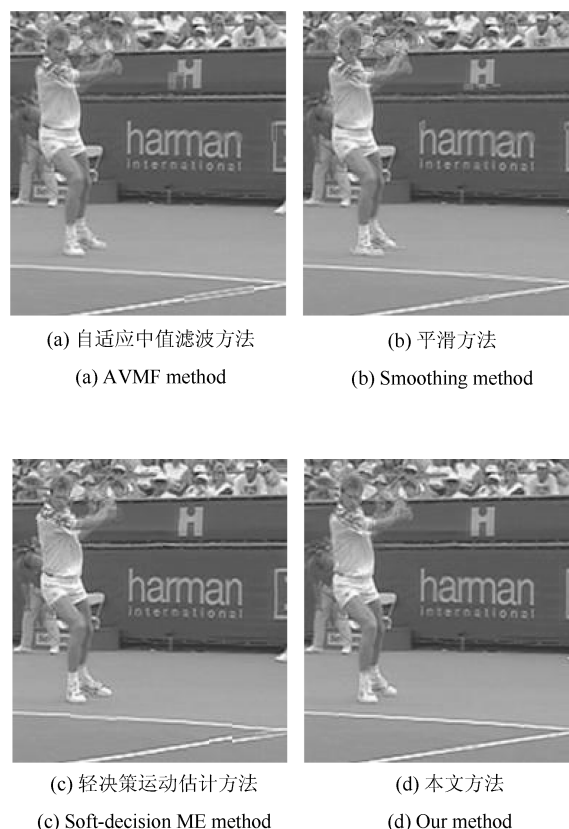


图 9 Stefan 序列第 16 帧视觉效果

Fig. 9 Experiment results of frame 16 of Stefan sequence

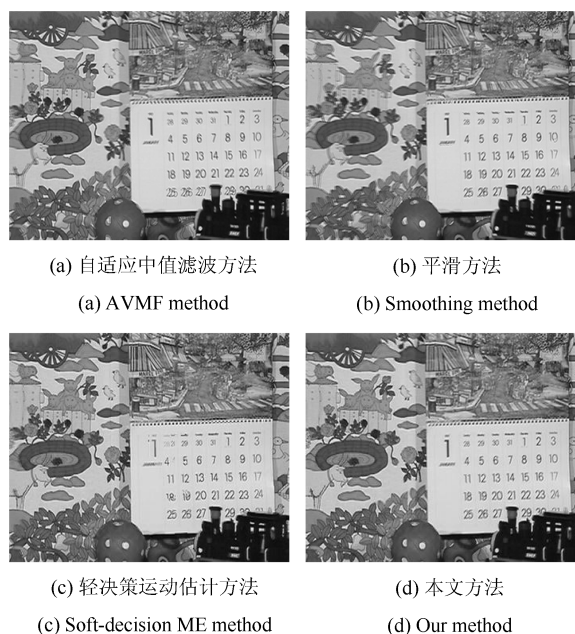


图 10 Mobile 序列第 34 帧视觉效果

Fig. 10 Experiment results of frame 34 of Mobile sequence

此外, 本文使用了 PSNR 和 SSIM 作为客观评

估标准. 以 Foreman 序列为例, 图 11 和图 12 是前 50 帧的 PSNR 和 SSIM 对比结果. 表 1 和表 2 则展示了视频 Foreman、Stefan 和 Mobile 序列前 50 帧的 PSNR 和 SSIM 均值对比结果. 从总体上看, 本文算法在 PSNR 和 SSIM 评估标准上较其他方法都有一定的提升.

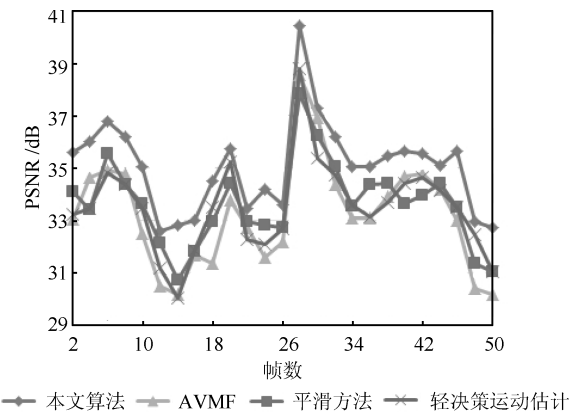


图 11 Foreman 序列前 50 帧的 PSNR 对比图
Fig. 11 Comparison of the PSNR performances on Foreman sequence

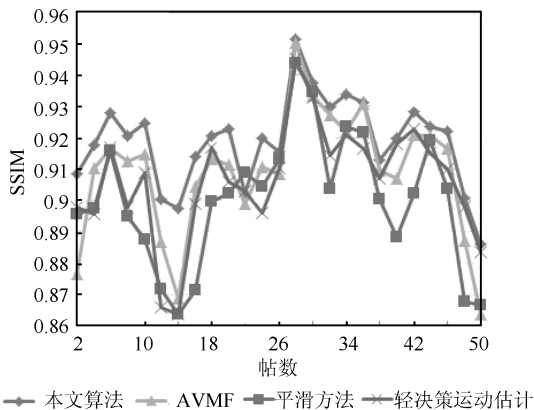


图 12 Foreman 序列前 50 帧的 SSIM 对比图
Fig. 12 Comparison of the SSIM performances on Foreman sequence

最后, 本文就算法的计算复杂度进行分析. 传统的运动补偿插帧开销为 $O(X \times Y \times d)$, 这里 X 、 Y 分别为内插帧的宽和高方向上块的数量, d 为 MV 的维数, 等于 2. 本文算法中, 聚类分割处理需要额外的时间开销 $O(X \times Y \times k^2 \times d)$, k 为簇的数目; 但聚类后针对运动区域中不可靠块进行处理, 避免了大面积的相对静止的区域, 例如背景区域的计算. 因此总体上时间开销的数量级不会增大.

3 结论

本文提出了一种基于加权运动估计和运动矢量聚类分割的 MCFI 算法框架. 首先, 为了获得较为

真实的运动矢量, 提出了一种加权运动估计方法. 其次, 依据视频帧的运动矢量, 采用聚类算法将其分割为运动区域和背景. 随后, 对运动区域的运动矢量进行可变块层次化处理. 最后, 对运动区域和背景使用双向运动补偿. 实验结果表明, 本文解决了传统的运动补偿内插算法所带来的方块效应和重影现象. 该算法在内插图像的主观视觉效果和客观评估标准上都有明显提升, 同时对于运动较快及背景较复杂的视频序列也具有较强的适应性. 目前本文还没有考虑使用相邻多帧进行运动补偿以提高插帧效果, 这将是今后所需研究的问题.

表 1 前 50 帧 PSNR 均值对比
Table 1 The average PSNR comparisons of top 50 frames

视频序列	AVMF	平滑方法	轻决策运动估计	本文算法
Foreman	33.577	33.657	32.807	35.087
Stefan	27.523	26.530	26.260	28.129
Mobile	27.323	24.602	25.171	27.988

表 2 前 50 帧 SSIM 均值对比
Table 2 The average SSIM comparisons of top 50 frames

视频序列	AVMF	平滑方法	轻决策运动估计	本文算法
Foreman	0.9089	0.9000	0.8797	0.9187
Stefan	0.8874	0.8719	0.8783	0.9086
Mobile	0.9424	0.8923	0.8783	0.9485

References

1 Choi B T, Lee S H, Ko S J. New frame rate up-conversion using bi-directional motion estimation. *IEEE Transactions on Consumer Electronics*, 2000, **46**(3): 603–609

2 Choi B D, Han J W, Kim C S, Ko S J. Motion compensated frame interpolation using bilateral motion estimation and adaptive overlapped block motion compensation. *IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology*, 2007, **17**(4): 407–416

3 Choi B D, Han J W, Kim C S, Ko S J. Frame rate up-conversion using perspective transform. *IEEE Transactions on Consumer Electronics*, 2006, **52**(3): 975–982

4 Cao Y Z, He X H, Teng Q Z, Wu W. Motion compensated frame rate up-conversion using soft-decision motion estimation and adaptive-weighted motion compensated interpolation. *Journal of Computational Information Systems*, 2013, **9**: 5789–5797

5 Ha T, Lee S, Kim J. Motion compensated frame interpolation by new block-based motion estimation algorithm. *IEEE Transactions on Consumer Electronics*, 2004, **50**(2): 752–759

6 Wang Wei, Li Wei. A multiple pattern algorithm for block motion estimation based on variable block-size. *Acta Automatica Sinica*, 2009, **35**(1): 34–38
(王伟, 李伟. 基于可变分块尺寸的多模板运动估计算法. *自动化学报*, 2009, **35**(1): 34–38)

- 7 Akin A, Cetin M, Ozcan Z, Erbagci B, Hamzaoglu I. An adaptive bilateral motion estimation algorithm and its hardware architecture. *IEEE Transactions on Consumer Electronics*, 2012, **58**(2): 712–720
- 8 Park D, Jeong J. Motion compensated frame rate up-conversion using modified adaptive extended bilateral motion estimation. *Journal of Automation and Control Engineering*, 2014, **2**(4): 371–375
- 9 Alparone L, Barni M, Bartolini F, Cappellini V. Adaptively weighted vector-median filters for motion-fields smoothing. In: *Proceedings of the 1996 International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing*. Atlanta, GA: IEEE, 1996. 2267–2270
- 10 Dane G, Nguyen T Q. Smooth motion vector resampling for standard compatible video post-processing. In: *Proceedings of the 38th Asilomar Conference on Signal, Systems and Computers*. Pacific Grove, California: IEEE, 2004. 1731–1735
- 11 Wang C, Zhang L, He Y H, Tan Y P. Frame rate up-conversion using trilateral filtering. *IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology*, 2010, **20**(6): 886–893
- 12 Zhong Min-Sheng, Ma Zheng-Ming. Motion compensation based on wavelet coefficient. *Acta Automatica Sinica*, 2004, **30**(1): 64–69
(钟敏生, 马争鸣. 基于小波系数块的运动补偿. 自动化学报, 2004, **30**(1): 64–69)
- 13 Guo D, Ling S, Han J G. Feature-based motion compensated interpolation for frame rate up-conversion. *Neurocomputing*, 2014, **123**: 390–397
- 14 Yu Ming, Qu Xin, Guo Ying-Chun, Zhu Qing-Wen, Yao Min. A delaunay mesh-based motion estimation and compensation scheme based on redundant wavelet transform. *Journal of Image and Graphics*, 2007, **12**(12): 2072–2079
(于明, 曲昕, 郭迎春, 朱庆文, 姚旻. 一种基于冗余小波变换的 DT 网格运动估计和运动补偿方法. 中国图象图形学报, 2007, **12**(12): 2072–2079)
- 15 Orchard M T, Sullivan G J. Overlapped block motion compensation: an estimation-theoretic approach. *IEEE Transactions on Image Processing*, 1994, **3**(5): 693–699
- 16 Zhai J F, Yu K, Li J, Li S P. A low complexity motion compensated frame interpolation method. In: *Proceedings of the 2005 International Symposium on Circuits and Systems*. Kobe, Japan: IEEE, 2005. 4927–4930
- 17 Huang A M, Nguyen T Q. A multistage motion vector processing method for motion-compensated frame interpolation. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2008, **17**(5): 694–708
- 18 Wang Z, Bovik A C, Sheikh H R, Simoncelli E P. Image quality assessment: from error visibility to structural similarity. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2004, **13**(4): 600–612



鲁志红 合肥工业大学计算机与信息学院硕士研究生. 主要研究方向为多媒体信息检索, 数字图像分析与处理.

E-mail: luzhihong5842@gmail.com

(**LU Zhi-Hong** Master student at the School of Computer and Information, Hefei University of Technology. His research interest covers multimedia

retrieval, digital image analysis, and processing.)



郭丹 合肥工业大学计算机与信息学院副教授. 主要研究方向为人工智能与数据挖掘. 本文通信作者.

E-mail: guodan@hfut.edu.cn

(**GUO Dan** Associate professor at the School of Computer and Information, Hefei University of Technology. Her research interest covers artificial intelligence and data mining. Corresponding author of this

paper.)



汪萌 合肥工业大学计算机与信息学院教授. 主要研究方向为多媒体信息处理、检索、挖掘、推荐及大规模计算.

E-mail: eric.mengwang@gmail.com

(**WANG Meng** Professor at the School of Computer and Information, Hefei University of Technology. His research interest covers multimedia content analysis, search, mining, recommendation, and large-scale computing.)