

一种非插值子像素精度运动估计方法^{*}

陈 虎, 张 萍, 程 建, 刘 钊

(电子科技大学 电子工程学院, 成都 611731)

摘 要: 为了降低子像素精度运动估计的复杂度, 提高运动估计的运行速度, 基于泰勒定理以及泰勒展开式, 提出一种不进行插值滤波的子像素精度运动估计方法。该算法以泰勒近似为基础, 通过对率失真优化准则进行分析以及近似, 以解二元一次方程组的形式获得子像素精度的运动矢量。实验表明, 相对于进行插值的子像素运动估计方法, 该方法能在保持运动补偿精度的基础上大幅度提高子像素精度运动估计的运行速度。

关键词: 子像素; 运动估计; 插值; 泰勒展开; 率失真优化

中图分类号: TP391

文献标志码: A

文章编号: 1001-3695(2011)02-0797-04

doi:10.3969/j.issn.1001-3695.2011.02.112

Novel sub pixel motion estimation without interpolation

CHEN Hu, ZHANG Ping, CHENG Jian, LIU Zhao

(School of Electronic Engineering, University of Electronic Science & Technology of China, Chengdu 611731, China)

Abstract: To reduce the complexity of sub pixel motion estimation and speed up the process of motion estimation, this paper proposed a novel sub pixel motion estimation algorithm without interpolation. This algorithm obtained the sub pixel motion vectors by solving a binary equation group which was from the Taylor approximation of rate-distortion optimization criterion. The simulations show that the proposal can speed up the sub pixel motion estimation significantly with keeping the accuracy of motion estimation compared with the sub pixel motion estimation with interpolation.

Key words: sub pixel; motion estimation; interpolation; Taylor series expansion; rate-distortion optimization

0 引言

由于物体运动的连续性, 序列图像中的物体在帧间产生的位移量可以是任意的, 采用具有子像素精度的运动预测能更有效地提高运动补偿预测的准确度。因此子像素运动估计已成为视频编码的重要技术之一。H. 264/AVC^[1]、H. 264/SVC^[2]等新一代的视频编码标准为了提高运动补偿精度, 采用了 1/4 精度的运动估计, 有效地提高了编码效率, 但是子像素位置的值实际上是不存在的, 需要利用相邻的整像素值的相关性进行插值滤波获得。H. 264/AVC 的 1/4 像素精度插值分为两步, 第一步是利用 6 抽头滤波器实现 1/2 像素的插值, 第二步是利用双线性插值实现 1/4 像素的插值, 该方法有效地匹配了 1/4 像素精度的运动估计搜索算法, 从而提高编码器的整体编码效率。然而 6 抽头滤波器以及双线性插值的运算复杂度相当高, 有实验表明, 该插值算法在 H. 264 整个编码过程中的耗时高达 18%^[3], 这极大地影响了编码运行速度, 同时对硬件资源(处理器、访问带宽、存储器)也提出了更高的要求, 限制了 H. 264/AVC 的应用。虽然很多研究提出了一些子像素精度运动搜索的快速算法^[4~9], 然而仍进行了插值运算, 依然具有较高的复杂度。本文通过对基于率失真优化准则的运动估计进行分析, 提出一种利用泰勒展开式来估计子像素精度运动矢量

的方法, 相对于进行插值运动估计方法, 该算法完全避免了插值运算, 有效地降低了运算复杂度, 同时较好地保持了运动估计的精度。

1 基于率失真优化准则的运动估计

H. 264/AVC、H. 264/SVC 等均采用率失真优化准则来进行运动估计, 率失真的优化准则可用式(1)来表示

$$RDcost = distortion + \lambda \cdot rate \quad (1)$$

其中: RDcost 表示运动搜索参考块的开销, 在率失真优化意义下, 开销越小表明该块越匹配当前块; distortion 为失真, 可采用 SAD、MSE、SSE 等准则来度量, 表明了参考块相对于当前块的失真度; rate 为采用该运动矢量的编码码率, 也就是 $rate = R_{mv}$, 表明了参考块的运动矢量的带宽开销。一般地, 在视频编码中, 高码率对应低失真, 低码率对应高失真, 因此率失真优化准则引入权重 λ 来控制着对 distortion 以及 rate 的关注度并平衡码率和失真度的取舍, 在基于率失真优化的运动估计过程中, 如果更重视空间失真因素对编码的影响, λ 应采用较小的值, 而若更重视码率的影响, λ 应采用较大的值。

本文首先用 SSE 准则来度量空间失真度, 假设 $g(x, y)$ 为当前块的像素, $f(x, y)$ 为参考帧对应位置的像素值, 假设当前的运动为 $(\Delta x, \Delta y)$, 当前块所在像素区域为 Z , 当前块与参考

收稿日期: 2010-07-06; **修回日期:** 2010-09-02 **基金项目:** 国家自然科学基金资助项目(60972109); 国家留学基金国家建设高水平大学公派研究生资助项目(2008101287); 中央高校基本科研业务费(ZYGX2009J012, ZYGX2009J024)

作者简介: 陈虎(1981-), 男, 四川绵阳人, 博士研究生, 主要研究方向为图像处理与视频编码(chenhu991604@gmail.com); 张萍(1976-), 女, 四川安岳人, 讲师, 博士研究生, 主要研究方向为视频编码; 程建(1978-), 男, 四川南部人, 副教授, 主要研究方向为机器视觉; 刘钊(1943-), 男, 四川成都人, 教授, 博导, 主要研究方向为图像处理、视频处理和通信。

块的 SSE 可表示为

$$SSE = \sum_{x,y \in Z} (g(x,y) - f(x + \Delta x, y + \Delta y))^2 \quad (2)$$

H.264/AVC 对运动矢量的可变长编码采用的指数哥伦布码,其码长可用下式表示

$$\begin{aligned} \text{len_total} &= \text{len}(M_x) + \text{len}(M_y) = \\ &2 \log_2(M_x + 1) + 1 + 2 \log_2(M_y + 1) + 1 = \\ &2(\log_2(M_x + 1) + \log_2(M_y + 1) + 1) \end{aligned} \quad (3)$$

其中, M 为待编码的值。

在基于率失真优化准则的运动估计中,一般用运动信息的码长来代替码率表示,综合式(1)~(3)可得运动估计中率失真优化准则的具体公式

$$\begin{aligned} \text{RDcost} &= \text{distortion} + \lambda \cdot \text{rate} = \sum_{x,y \in Z} (g(x,y) - f(x + \Delta x, y + \Delta y))^2 + \\ &\lambda \cdot (2(\log_2(M_x + 1) + \log_2(M_y + 1) + 1)) \end{aligned} \quad (4)$$

传统的运动搜索就是在参考帧中一定范围内,寻找使得式(4)最小的匹配块,从而计算出相应的运动矢量。

2 基于率失真优化准则的运动估计

在子像素精度的运动估计中,假设 $\Delta x, \Delta y$, 精度为子像素, $\Delta x, \Delta y$ 可以分为两个部分:整像素以及子像素部分,也就是 $\Delta x = \Delta x' + \delta x, \Delta y = \Delta y' + \delta y$, 其中, $(\Delta x', \Delta y')$ 为整像素位移, $(\delta x, \delta y)$ 为在 $(\Delta x', \Delta y')$ 基础上的子像素位移。从整体的运动位移来看 $\Delta x', \Delta y'$ 为整数, $\delta x, \delta y$ 为小于 1 的小数 ($|\delta x| < 1, |\delta y| < 1$)。

2.1 失真函数的泰勒近似

式(2)中,参考匹配块的像素 $f(x + \Delta x, y + \Delta y)$ 可以通过泰勒展开式展开得到

$$\begin{aligned} f(x + \Delta x, y + \Delta y) &= f(x + \Delta x' + \delta x, y + \Delta y' + \delta y) = \\ &f(x + \Delta x', y + \Delta y') + \delta x \cdot \frac{\partial f(x + \Delta x', y + \Delta y')}{\partial x} + \\ &\delta y \cdot \frac{\partial f(x + \Delta x', y + \Delta y')}{\partial y} + O(\cdot) \end{aligned} \quad (5)$$

其中: $O(\cdot)$ 为高阶项,去除高阶项可以得到

$$\begin{aligned} f(x + \Delta x, y + \Delta y) &\approx f(x + \Delta x', y + \Delta y') + \\ &\delta x \cdot \frac{\partial f(x + \Delta x', y + \Delta y')}{\partial x} + \delta y \cdot \frac{\partial f(x + \Delta x', y + \Delta y')}{\partial y} \end{aligned} \quad (6)$$

其中: $|\delta x| < 1, |\delta y| < 1$ 。

将式(6)代入(2)可以得到 SSE 准则的近似表达式

$$\begin{aligned} \text{SSE}(\Delta x, \Delta y) &= \sum_{x,y \in Z} (g(x,y) - f(x + \Delta x, y + \Delta y))^2 \approx \\ &\sum_{x,y \in Z} (g(x,y) - f(x + \Delta x', y + \Delta y') - \delta x \cdot \frac{\partial f(x + \Delta x', y + \Delta y')}{\partial x} - \\ &\delta y \cdot \frac{\partial f(x + \Delta x', y + \Delta y')}{\partial y})^2 \end{aligned} \quad (7)$$

2.2 码率函数的泰勒近似

运动矢量可正可负,因此其指数哥伦布码中码长的具体计算式为(x 方向)

$$\begin{aligned} \text{len}_x &= 2 \log_2(M_x + 1) + 1 = \begin{cases} 2 \log_2(2\Delta x - 1 + 1) + 1 & \Delta x > 0 \\ 2 \log_2(-2\Delta x + 1) + 1 & \Delta x \leq 0 \end{cases} = \\ &\begin{cases} 2 \log_2(2\Delta x) + 1 & \Delta x > 0 \\ 2 \log_2(-2\Delta x + 1) + 1 & \Delta x \leq 0 \end{cases} \end{aligned} \quad (8)$$

根据泰勒定理

a) 若 $\Delta x' \geq 1$ 有

$$\begin{aligned} f(\Delta x) &= 2 \log_2(2\Delta x) + 1 = f(\Delta x') + f'(\Delta x')(\Delta x - \Delta x') + O(\cdot) \approx \\ &f(\Delta x') + f'(\Delta x') \cdot \delta x = 2 \log_2(2\Delta x') + 1 + \frac{2}{\ln 2} \cdot \frac{1}{\Delta x'} \cdot \delta x \end{aligned} \quad (9)$$

b) 若 $\Delta x' \leq -1$ 有

$$\begin{aligned} f(\Delta x) &= 2 \log_2(-2\Delta x + 1) + 1 = f(\Delta x') + f'(\Delta x')(\Delta x - \Delta x') + \\ &O(\cdot) \approx f(\Delta x') + f'(\Delta x') \cdot \delta x = 2 \log_2(-2\Delta x' + 1) + \\ &1 + \frac{2}{\ln 2} \cdot \frac{-2}{-2\Delta x' + 1} \cdot \delta x \end{aligned} \quad (10)$$

c) 若 $\Delta x' = 0, \delta x > 0$, 其等价于 $\Delta x' = 1, \delta x' = \delta x - 1 < 0$, 有

$$f(\Delta x) = 2 \log_2(2\Delta x) + 1 = f(\Delta x') + f'(\Delta x')(\Delta x - \Delta x') + O(\cdot) \approx$$

$$f(1) + f'(1) \cdot \delta x' = 2 \log_2(2) + 1 + \frac{2}{\ln 2} \cdot (\delta x - 1) \quad (11)$$

d) 若 $\Delta x' = 0, \delta x \leq 0$ 有

$$\begin{aligned} f(\Delta x) &= 2 \log_2(-2\Delta x + 1) + 1 = f(\Delta x') + f'(\Delta x')(\Delta x - \Delta x') + \\ &O(\cdot) \approx f(\Delta x') + f'(\Delta x') \cdot \delta x = 2 \log_2(-2\Delta x' + 1) + \\ &1 + \frac{2}{\ln 2} \cdot \frac{-2}{-2\Delta x' + 1} \cdot \delta x \end{aligned} \quad (12)$$

因此,综合式(9)~(12)有

$$\text{len}(\Delta x) \approx \begin{cases} 2 \log_2(2\Delta x') + 1 + \frac{2}{\ln 2} \cdot \frac{1}{\Delta x'} \cdot \delta x & \text{when } \Delta x' \geq 1 \\ 2 \log_2(2) + 1 + \frac{2}{\ln 2} \cdot (\delta x - 1) & \text{when } \Delta x' = 0, \delta x > 0 \\ 2 \log_2(-2\Delta x' + 1) + 1 + \frac{2}{\ln 2} \cdot \frac{-2}{-2\Delta x' + 1} \cdot \delta x & \text{when } \Delta x' \leq -1 \text{ or } (\Delta x' = 0, \delta x \leq 0) \end{cases} \quad (13)$$

同理对于 y 方向有

$$\text{len}(\Delta y) \approx \begin{cases} 2 \log_2(2\Delta y') + 1 + \frac{2}{\ln 2} \cdot \frac{1}{\Delta y'} \cdot \delta y & \text{when } \Delta y' \geq 1 \\ 2 \log_2(2) + 1 + \frac{2}{\ln 2} \cdot (\delta y - 1) & \text{when } \Delta y' = 0, \delta y > 0 \\ 2 \log_2(-2\Delta y' + 1) + 1 + \frac{2}{\ln 2} \cdot \frac{-2}{-2\Delta y' + 1} \cdot \delta y & \text{when } \Delta y' \leq -1 \text{ or } (\Delta y' = 0, \delta y \leq 0) \end{cases} \quad (14)$$

式(4)具体表达式可由式(7)(13)(14)综合得到,表现形式为

$$\begin{aligned} \text{RDcost}(\Delta x, \Delta y) &= \text{distortion} + \lambda \cdot \text{rate} = \\ \text{SSE}(\Delta x, \Delta y) &+ \lambda \cdot (\text{len}(\Delta x) + \text{len}(\Delta y)) = \\ \text{SSE}(\Delta x' + \delta x, \Delta y' + \delta y) &+ \lambda \cdot (\text{len}(\Delta x' + \delta x) + \text{len}(\Delta y' + \delta y)) \end{aligned} \quad (15)$$

可以看出,式(15)为泰勒近似的以运动矢量为形参的率失真优化准则函数,在率失真优化准则意义上,使 RDcost 最小的参数 $\Delta x, \Delta y$ 即是最佳的运动矢量。

2.3 码率函数的泰勒近似

若已经得到运动矢量的整像素精度值 $(\Delta x', \Delta y')$ (通过整像素快速运动搜索),可将求最佳的子像素精度的运动矢量转换为求使得 RDcost 最小的 $(\delta x, \delta y)$ 。

根据极值定理以及式(15)最小的 $(\delta x, \delta y)$ 满足

$$\frac{\partial (\text{RDcost}(\Delta x, \Delta y))}{\partial (\delta x)} = 0 \quad (16)$$

$$\frac{\partial (\text{RDcost}(\Delta x, \Delta y))}{\partial (\delta y)} = 0 \quad (17)$$

由式(16)和(17),可得到未知数为 $(\delta x, \delta y)$ 的二元一次方程组,解该二元一次方程组可得到子像素精度的 $(\delta x, \delta y)$ 。

举个例子,对于当前块,若整像素运动矢量值满足 $(\Delta x' > 1, \Delta y' > 1)$ 。通过结合式(15)~(17)可推导出以下方程式:

$$\left\{ \begin{aligned} &\delta x \cdot \sum_{x,y \in Z} \left(\frac{\partial f(x + \Delta x', y + \Delta y')}{\partial x} \right)^2 + \\ &\delta y \cdot \sum_{x,y \in Z} \frac{\partial f(x + \Delta x', y + \Delta y')}{\partial x} \cdot \frac{\partial f(x + \Delta x', y + \Delta y')}{\partial y} = \\ &\frac{\lambda}{\ln 2} \cdot \frac{1}{\Delta x'} + \sum_{x,y \in Z} \frac{\partial f(x + \Delta x', y + \Delta y')}{\partial x} (g(x, y) - f(x + \Delta x', y + \Delta y')) \\ &\delta y \cdot \sum_{x,y \in Z} \left(\frac{\partial f(x + \Delta x', y + \Delta y')}{\partial y} \right)^2 + \\ &\delta x \cdot \sum_{x,y \in Z} \frac{\partial f(x + \Delta x', y + \Delta y')}{\partial x} \cdot \frac{\partial f(x + \Delta x', y + \Delta y')}{\partial y} = \frac{\lambda}{\ln 2} \cdot \frac{1}{\Delta y'} + \\ &\sum_{x,y \in Z} \frac{\partial f(x + \Delta x', y + \Delta y')}{\partial y} (g(x, y) - f(x + \Delta x', y + \Delta y')) \end{aligned} \right. \quad (18)$$

其中: $(\Delta x', \Delta y')$ 为整像素运动(已知), $\frac{\partial f(x + \Delta x', y + \Delta y')}{\partial x}$ 、 $\frac{\partial f(x + \Delta x', y + \Delta y')}{\partial y}$ 分别为像素在 x, y 方向上的梯度,可使用数字图像的简单梯度式或梯度算子计算得到。

3 基于泰勒近似的子像素运动估计的算法框架

基于以上对率失真优化准则以及运动估计的分析,本文提出一种基于泰勒近似的非插值的子像素进度运动估计算法,其框架如图 1 所示。主要分以下几个步骤:

- a)通过快速搜索获得整像素精度的运动矢量,依据该运动矢量得到整像素精度下的最佳匹配块。
- b)计算该匹配块的像素梯度值。
- c)泰勒近似。通过整像素运动矢量和泰勒展开式得到类似式(17)的二元一次方程组。同时依据参考块梯度值、当前块像素、参考块像素计算系数并解二元一次方程组得到子像素位移。
- d)子像素位移和整像素位移整合得到子像素精度的运动矢量。

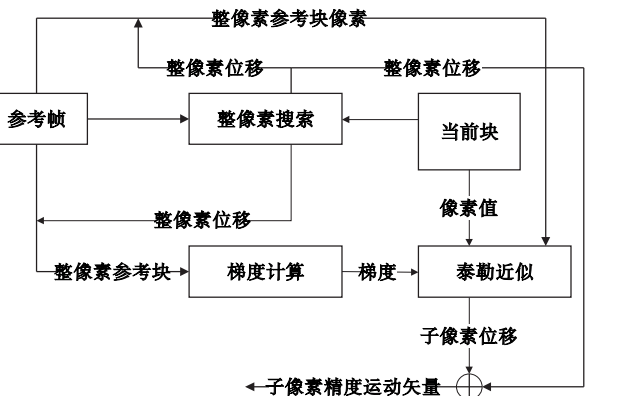


图1 基于泰勒近似的非插值子像素精度运动估计框架

相较于 H. 264/AVC 的插值子像素运动估计方法,本算法减少了两次像素插值以及子像素点运动搜索等步骤,增加了梯度计算、系数计算和解简单二元一次方程组等步骤。显然本算法的增加步骤的复杂度远远低于两次像素插值以及子像素点的运动搜索。

4 仿真实验

仿真实验中,选择 100 帧标准序列图像 soccer、ice、foreman、football 作为测试对象。图像格式为 CIF(352 × 288),帧率为 30 fps。宏块大小固定为 16 × 16,搜索范围为 $(-16, +16)$ 。

选择作为测试的整像素快速算法为菱形搜索法(DS)^[10]和三步搜索法(TSS),在同一测试环境下,对基于 H. 264/AVC 插值滤波的 1/4 像素精度运动搜索以及本文建议的基于快速整像素搜索的泰勒近似法进行性能比较。从两个方面进行比较,即算法的运动补偿精确度和算法复杂度。

1) 运动补偿精确度

本文算法的目的是在保持图像质量的前提下有效降低运算复杂度,因此首先对算法运动补偿精确度(重构图像质量)进行评估。本文采用运动补偿重建帧的平均峰值信噪比(PSNR)来评估运动预测补偿的精确度。表 1、2 所示的是本文算法与插值搜索算法重构帧 PSNR 值的比较。表 1 为参考帧与当前帧相差一帧的情况,表 2 为参考帧与当前帧相差三帧的情况。其中“+ I”代表基于插值运算的子像素精度,“+ T”代表本文提出的结合泰勒近似的运动估计算法。

表 1 泰勒近似算法与插值搜索算法的比较(相差 1 帧)

算法	football		foreman	
	PSNR	ΔPSNR	PSNR	ΔPSNR
DS + I	24.04	0	30.48	0
DS + T	23.99	-0.05	30.23	-0.25
TSS + I	24.40	0	29.93	0
TSS + T	24.33	-0.07	29.75	-0.18

算法	ice		soccer	
	PSNR	ΔPSNR	PSNR	ΔPSNR
DS + I	31.43	0	29.16	0
DS + T	31.40	-0.03	28.99	-0.17
TSS + I	30.72	0	28.72	0
TSS + T	30.76	+0.04	28.70	-0.02

表 2 泰勒近似算法与插值搜索算法的比较(相差 3 帧)

算法	football		foreman	
	PSNR	ΔPSNR	PSNR	ΔPSNR
DS + I	20.93	0	24.83	0
DS + T	20.96	+0.03	24.74	-0.09
TSS + I	21.71	0	25.14	0
TSS + T	21.74	+0.03	24.96	-0.18

算法	ice		soccer	
	PSNR	ΔPSNR	PSNR	ΔPSNR
DS + I	25.24	0	22.86	0
DS + T	25.25	+0.01	22.84	-0.02
TSS + I	26.21	0	24.03	0
TSS + T	26.18	-0.03	24.10	+0.07

从表 1、2 可以看出,总体上,本文算法重构图像的质量略微低于基于插值的子像素精度运动搜索重构质量,PSNR 值相差不大。由此可以看出,本文提出的基于泰勒近似的子像素精度运动矢量计算方法能够有效保持运动补偿的精度,不会造成精度较大的损失或下降。

图 2 显示的是当参考帧与当前帧相差 3 帧时每一帧中两种算法运动补偿的比较。从图可以看出,对于大多数帧,插值搜索法与本文提出的算法恢复图像精度相差不大。可见本文的算法能较好地保持运动补偿精度。

2) 运算复杂度

运动估计中,运动搜索的算法复杂度可用搜索点数以及搜索时间来评估。由于本算法的搜索点数与整像素运动搜索的点数一致,子像素精度的值是数值计算得到的,本文主要采用搜索运行时间来评估算法的复杂度,虽然搜索时间受到平台、代码优化等诸多因素影响,然而由于运动估计的运行时间较长,在相近的条件下,本文对运动估计整体运行时间、插值运行时间以及子像素精度运动估计运行时间进行大致评估。令基于插值的子像素运动估计的运行时间为 100,作为基准,各算法的运行时间如表 3 所示。

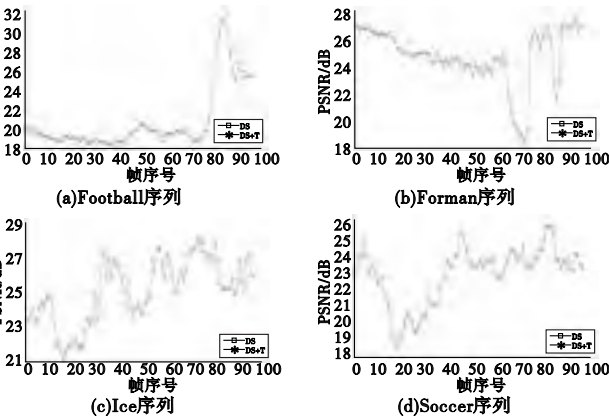


图2 泰勒近似算法与插值搜索算法的逐帧比较

表 3 泰勒近似算法与插值搜索算法的时间比较

序列	项目	算法			
		DS + I	DS + T	TSS + I	TSS + T
Foot-Ball	总时间	100	6	100	5.3
	插值时间	93.9	无	94.6	无
	运动搜索	6.1	6	5.4	5.3
Fore-Man	总时间	100	3.9	100	5
	插值时间	95.8	无	94.6	无
	运动搜索	4.2	3.9	5.4	5
Ice	总时间	100	3.6	100	5.1
	插值时间	96.1	无	94.7	无
	运动搜索	3.9	3.6	5.3	5.1
Soc-cer	总时间	100	4.4	100	5.2
	插值时间	95.3	无	94.6	无
	运动搜索	4.7	4.4	5.4	5.2

由表 3 可以看出,插值占据了整个运动估计 90% 以上的时间,因此基于插值的子像素运动估计方法的复杂度很高。可以预见,即使通过快速算法、代码优化等来提高插值运算速度,其依然会占据一定的运行时间。本文提出的方法采用泰勒近似并通过解二元一次方程组来估算子像素精度的运动矢量,无须进行插值运算,同时运行时间低于插值后的子像素运动精度

搜索过程,因此运算量极低,实时性更佳。

5 结束语

子像素精度的运动估计虽然带来了运动补偿精度的提升,但是同时也使得运算的复杂度大为增加,特别是插值算法的运算量非常巨大,使得其实时性应用具有局限性。本文首先对基于率失真优化准则的运动估计进行了泰勒展开以及近似分析,基于分析结果以及整像素的运动估计方法,提出一种新颖的子像素精度运动估计方法,该方法的最大特点是不通过插值算法而得到子像素的运动位移。实验结果表明,该算法在保持运动补偿精度的情况下,能大幅度降低子像素精度运动估计的复杂度,提高了运动估计算法的运算速度以及实时性。

参考文献:

[1] WIEGAND T, SULLIVAN G J, BJONTEGAARD G, *et al.* Overview of the H. 264/AVC video coding standard [J]. *IEEE Trans on Circuit and System for Video Technology*, 2003, 13(7): 560-576.

[2] ISO/IECJTC1/SC29/WG11, N6193: call for proposals on scalable video coding technology[S]. 2003.

[3] 侯金亭. H. 264/AVC 编码器子像素插值快速实现方法[J]. *计算机工程与应用*, 2006, 42(33): 94-96.

[4] DU Cheng, HE Yun, ZHENG Jun-li. PPHPS: a parabolic prediction based fast half-pixel search algorithm for very low bit-rate moving picture coding [J]. *IEEE Trans on Circuit System for Video Technology*, 2003, 13(6): 514-518.

[5] ZHOU Z, SUN M T. Fast macroblock inter mode decision and motion estimation for H. 264/MPEG-4 AVC [C]//*Proc of International Conference on Image Processing*. Singapore: IEEE Press, 2004: 789-792.

[6] CHEN Z, ZHOU P, HE Y. Fast integer pel and fractional pel motion estimation for H. 264/AVC [J]. *Journal of Visual Communication and Image Representation*, 2006, 17(2): 264-290.

[7] YANG L, YUK, LI J, *et al.* Prediction-based directional fractional pixel motion estimation for H. 264 video coding [C]//*Proc of International Conference on Acoustics Speech and Signal Processing*. Philadelphia: IEEE Press, 2005: 901-904.

[8] LIN Wei-Yao, BAYLON D, PANUSOPONE K, *et al.* Fast sub-pixel motion estimation and mode decision for H. 264 [C]//*Proc of International Symposium on Circuits and Systems*. Seattle, WA: IEEE Press, 2008: 3482-3485.

[9] 李朝晖, 张琦, 李冬梅. 一种高性能高清视频编码分像素插值滤波算法[J]. *电视技术*, 2008, 32(5): 10-13.

[10] ZHU Shan-zhu, MA Kai-Kuang. A new diamond search algorithm for fast block-matching motion estimation [J]. *IEEE Trans on Image Processing*, 2000, 9(2): 287-290.

(上接第 796 页)

[10] KAZHDAN M, BOLITHO M, HOPPE H. Poisson surface reconstruction [C]//*Proc of ACM International Conference on Proceeding Series*. 2006: 61-70.

[11] MANSON J, PETROVA G, SCHAEFER S. Streaming surface reconstruction using wavelets [C]//*Proc of Eurographics Symposium on Geometry Processing*. 2008: 1411-1420.

[12] ZHOU K, GONG M, HUANG X, *et al.* Highly parallel surface re-

construction, MSR-TR-2008-53 [R]. [S. l.]: Microsoft Research, 2008.

[13] MARTIN R R, STROUD I A, MARSHAL A D. Data reduction for reverse engineering, 1068 [R]. Budapest, Hungary: Computer and Automation Institute of Hungarian Academy of Science, 1996.

[14] <http://www.robots.ox.ac.uk/~vgg/data/data-mview.html> [EB/OL].

[15] <http://grail.cs.washington.edu/software/pmvs/> [EB/OL].