

文章编号:1001-9081(2008)02-0385-04

基于运动检测的 H. 264 码率控制的算法

李慧然¹, 彭 强¹, 陈 睿²

(1. 西南交通大学 信息科学与技术学院, 成都 610031; 2. 中兴通讯股份有限公司 中心研究院, 广东 深圳 518057)

(asherens@126.com)

摘 要:针对 H. 264/AVC 经典流控算法 JVT-G012 对运动剧烈图像流控效率的不足, 提出了一种基于图像运动剧烈程度的流控算法。对运动剧烈的图像, 在同一复杂度区域内, 用前一帧实际编码码率与目标码率的差值调整当前帧目标码率, 并且编码时利用最小率失真模式的原始帧和重建帧的 SAD 估计 MAD 值, 根据二次模型估计量化参数优化拉格朗日参数。仿真试验证明与 JVT-G012 以及 Jiang 等对 H. 264/AVC 的改进的码率控制算法相比, 在运动剧烈或者场景切换时, 虽然码率比 JVT-G012 略有增加但低于 Jiang 等的改进算法, 并且变化剧烈的视频帧图像信噪比有明显的增加, 平均信噪比也得到了提高。

关键词:码率控制; 运动检测; 量化参数; 二次模型; 拉格朗日参数; H. 264/AVC

中图分类号: TP37 **文献标志码:** A

Novel bit-rate control algorithm for H. 264 based on motion detection

LI Hui-ran¹, PENG Qiang¹, CHEN Rui²

(1. School of Information Science & Technology, Southwest Jiaotong University, Chengdu Sichuan 610031, China;

2. ZTE Central Research and Development, ZTE Corporation, Shenzhen Guangdong 518057, China)

Abstract: This paper aimed at the rate control problems of JVT-G012, the typical algorithm for H. 264/AVC, and presented a new rate control algorithm. After motion detection, if the previous and current frame were in the same complex area, factual encode rate of the previous frame was used to adjust target rate of the current frame. As for the scene changes and high motion video based on motion detection, the minimum sum of squared difference between original and reconstructed pixels after the rate distortion option was used to estimate MAD, and then, MAD was used to compute quantization parameter based on the quadratic model in the process of encoding. The Lagrange parameter can be optimized. The experimental results show that the rate of this algorithm is higher than JVT-G012 and lower than Improvement of H. 264/AVC by JIANG but the scheme of this paper can effectively improve video quality at scene changes and high motions. Moreover, the scheme also enhances the average PSNR of the test sequences compared to JVT-G012 and JIANG's Improvement.

Key words: Rate control; motion detection; quantization parameter; quadratic model; LaGrange parameter; H. 264/AVC

0 引言

在目前主要的编码标准 H. 264、H. 263、MPEG-4、MPEG-2 算法中码率控制技术是必不可少的组成部分, 码率控制策略的好坏是视频编码器成功与否的关键因素之一。H. 264 将量化参数同时用于码率控制算法和率失真优化导致了蛋鸡悖论, 给 H. 264 码率控制带来困难。目前 H. 264 的方案主要有以下几种: 在 JVT-F086 方案^[1]中通过改进 MPEG-2 TMN5 的码率控制算法使之能适用于 H. 264 编码, 其算法沿用帧比特分配和两次 R-D 模式判别的思想, 在宏块层进行码率控制, 但存在着比特分配不准确以及计算量过大等缺点; JVT-G012 采用文献[2]中的算法, 提出流量往返模型来分配每个基本单元编码比特数, 并在宏块层编码采用二次率失真函数计算量化参数, 其算法优于 JVT-F086。但 JVT-G012 作为目前经典的流控算法存在着一些缺陷。比如在处理运动剧烈和场景切换的图像时, 由于使用前一帧相同位置基本单元的 MAD 值线性预测当前基本单元的 MAD 值, 导致 MAD 值以及 QP 预测不准确的缺陷, 并且由于运动剧烈的序列采用传统的平均分配码流, 使得运动剧烈或者场景切换的图像质量

下降。目前针对以上问题不少学者又提出以下几种算法: 文献[3]中提出用当前帧 MAD 值与已经编码帧平均 MAD 值的比率与 $PSNR_{\text{droption}}$ 的权重系数和来衡量图像的复杂度, 根据复杂度分配目标码流, 可以准确地检测运动剧烈及场景变换, 并提高了图像质量, 但是该算法采用线性模型估计当前宏块的 MAD 值, 导致 MAD 值以及 QP 预测不够准确。文献[4]中提出利用图像信息在编码过程中更准确估计 QP 值, 该算法在运动补偿后用最小运动向量开销近似 MAD 值, 根据二次模型重新估计 QP, 从而优化拉格朗日参数。由于该优化在运动补偿后进行, 忽略 8×8 以及 8×8 的子模式的优化, 而运动剧烈的图像的编码模式有很大部分采用 8×8 及其 8×8 子模式编码, 所以文献[4]的算法仍然没有充分利用图像信息。

另外, 文献[5]中针对量化后零系数所占比率和编码码率之间的近似线性关系提出一种低复杂度的码率控制方法。李蕾等在文献[6]中使用前后两帧图像直方图的 SAD 作为帧编码复杂度的测量准则, 提出一种实时的无需二次编码的比特分配和码率控制方法。文献[7]中提出一种丢包网络中联合信源信道的码率控制方法。但以上这些方法的主要目的是解决蛋鸡悖论问题, 并没有针对运动剧烈或场景切换的图像进行深入的研究和处理。

收稿日期: 2007-08-22; 修回日期: 2007-11-22。 **基金项目:** 国家自然科学基金资助项目(60672099); 中兴通讯股份有限公司基金项目。

作者简介: 李慧然(1981-), 女, 四川乐山人, 硕士研究生, 主要研究方向: 视频图像压缩编码及传输控制技术、图像处理; 彭强(1962-), 男, 四川成都人, 教授, 主要研究方向: 图像压缩编码、多媒体; 陈睿(1976-), 男, 博士, 主要研究方向: 计算机视觉、数字图像处理、计算机图形学。

本文针对以上问题,提出了一种基于运动剧烈及场景变换检测的流控算法,首先采用了文献[3]的算法思想,在编码前检测到图像帧的运动剧烈程度后,针对运动剧烈的帧的宏块根据图像信息进行 MAD 优化,并且利用同一复杂度内连续图像码率相似性准确的分配目标码率;针对运动剧烈的图像,在编码过程中充分利用图像信息对编码参数以及拉格朗日参数进行优化。实验仿真表明在运动剧烈或场景切换的序列本文的算法与 JVTG-012 的算法以及文献[3]的算法相比 PSNR 有显著提高,而码率则比 JVT-G012 略有增加但低于文献[3]。

1 基于运动剧烈图像检测的码率控制

文献[3]在帧层码率控制算法中使用了 $MAD_{ratio}(i, j)$ 和 $PSNR_{drop-ratio}(i, j)$ 权重系数和对图像复杂度进行检测,即:

$$FC = \varpi \times MAD_{ratio}(i, j) + (1 - \varpi) \times PSNR_{drop-ratio}(i, j) \quad (1)$$

其中 (i, j) 表示第 i 个 GOP 的第 j 帧, FC 为图像复杂度, ϖ 为权重系数取 0.75^[3]。 $MAD_{ratio}(i, j)$ 为 j 帧的 MAD 值与已编码 P 帧的 MAD 平均值的比率,用式(2)计算:

$$MAD_{ratio}(i, j) = \frac{MADP(i, l)}{[1/(j-1)] \times \sum_{l=0}^{j-1} MADA(i, l)} \quad (2)$$

其中 $MAD(i, l)$ 表示 j 帧前已编码的第 l 帧的实际 MAD 值, $j-l$ 表示 GOP 中已编码的 P 帧的数目, $MADP(i, l)$ 为 j 帧的 MAD 值预测值,由式(3)计算:

$$MADP(i, l) = MAD_{cb} = a_1 \times MAD_{pb} + a_2 \quad (3)$$

其中 MAD_{cb} 和 MAD_{pb} 分别当前帧 MAD 值的预测值和前一帧的实际 MAD 值; a_1 和 a_2 为预测模型的两个系数, a_1 和 a_2 的初始值分别设为 1 和 0,每编完一基本单元时进行更新^[3]。

$PSNR_{drop-ratio}(i, j)$ 为 j 帧的 $PSNR_{drop}(i, j)$ 与 j 帧前已经编码帧的 $PSNR_{drop}(i, j)$ 的平均值的比率。由式(4)计算:

$$PSNR_{drop-ratio}(i, j) = \frac{PSNR_{drop}(i, j)}{(1/j) \times \sum_{l=0}^{j-1} PSNR_{drop}(i, j)} \quad (4)$$

其中 $PSNR_{drop}(i, j)$ 为内插 j 帧得到的 $PSNR$ 值与 $j-1$ 实际 $PSNR$ 值的差,由式(5)计算:

$$PSNR_{drop}(i, j) = PSNR_{j-1}(i, j) - PSNR_{skip}(i, j) \quad (5)$$

$PSNR_{j-1}(i, j)$ 表示 $j-1$ 帧实际的 $PSNR$ 值, $PSNR_{skip}(i, j)$ 表示用重建的 $j-1$ 帧内插得到 j 帧的 $PSNR$ 值。

文献[3]根据 FC 检测当前图像是否运动剧烈,由此分配目标码率。该算法根据图像的复杂度进行目标码率的分配提高了运动剧烈或场景切换图像的质量。但是该算法采用线性预测模型,估计当前宏块的 MAD 值以解决蛋鸡悖论,而运动剧烈或场景切换的图像将导致 MAD 预测不准确。本文虽然采用了文献[3] FC 的计算方法,在帧层初始化时,根据 FC 检测运动剧烈的图像或场景切换图像,但在编码时利用最小率失真模式的原始帧和重建帧的绝对差值和(SAD)来估计 MAD 值,避免了运动剧烈或场景切换图像线性预测的不准确性。

2 H. 264 中的率失真模型及编码优化

在 H. 264 中,码率和失真度的关系如下:

$$\min D; R < R_c \quad (6)$$

其中 D 为失真, R 为实际编码码率, R_c 为允许的最大码率。

用拉格朗日参数函数将 RD 关系转换为率失真函数为:

$$\min J; J = D + \lambda \times R \quad (7)$$

其中 J 为率失真函数。运动估计和模式选择都使用了率失真函数。运动估计选择失真最小的运动向量的率失真函数为:

$$J_{MV} = SAD_{MV} + \lambda_{motion} \times R_{MV} \quad (8)$$

J_{MV} 为运动估计率失真函数, SAD_{MV} 为运动补偿后原始帧与参考帧的绝对差值和, R_{MV} 为运动向量的比特数, λ_{motion} 为最佳运动模式选择的拉格朗日参数。

在编码过程中选择失真最小的帧内、帧间编码模式进行编码。编码模式的率失真计算如下:

$$J_M = SSD_M + \lambda_{mode} \times R_M \quad (9)$$

J_M 为模式选择率失真函数, SSD_M 是原始帧和重建帧的绝对差值和, R_M 是当前宏块的比特数, λ_{mode} 为最佳编码模式选择的拉格朗日参数。

式(9)中的 λ_{mode} 、 λ_{motion} 分别计算如下:

$$\lambda_{mode} = 0.85 \times 2^{(QP-12)/3} \quad (10)$$

$$\lambda_{motion} = \sqrt{\lambda_{mode}} \quad (11)$$

综上可知,根据 QP 调整拉格朗日参数,可以通过流控控制 QP 。为了计算率失真优化(RDO)所需要的拉格朗日参数,需要在编码前得到 QP ,但是 QP 的计算依赖于编码后残差信息(MAD),这就造成了蛋鸡悖论。

为了解决 QP 矛盾,已有 H. 264 流控算法在编码前进行 MAD 值的估计,利用二次模型估计 QP ,其过程如图 1 所示。

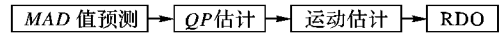


图 1 H. 264 流控过程

对于运动剧烈或场景切换的图像,以上过程将导致 MAD 以及 QP 估计不准确。文献[4]采用在运动估计后用最小的 J_{MV} 通过二次模型优化 QP ,通过式(10)计算 λ_{mode} 。由于在运动估计后,不能优化 8×8 及其子模式,但是运动剧烈情况下帧间编码模式大部分为 8×8 及其子模式,因而造成 QP 估计不够准确。本文在 RDO 后,用最小 J_M 模式的 SSD_M 估计 MAD ,通过二次模型估计 QP ,优化每种编码模式,其过程如图 2 所示。

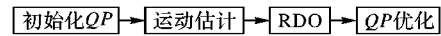


图 2 改进后的 H. 264 流控过程

优化具体步骤如下:

- 1) 由初始化的 QP 用式(10)计算 λ_{mode} 。
- 2) 对所有模式进行 RDO,记录最小 J_M 编码模式的 SSD_M 。
- 3) 根据 SSD_M 按照式(12)计算 $MAD_{(pred)}$:

$$MAD_{(pred)} = SSD_M \times 1.0/256 \quad (12)$$

- 4) 根据二次模型式(13)估计 QP ,用式(10)优化 λ_{mode} 。

$$rate = \alpha_1 \times MAD/QP + \alpha_2 \times MAD/QP^2 \quad (13)$$

其中 α_1, α_2 在编码完一帧后更新, $rate$ 为编码当前宏块的码率。

- 5) 编码。

试验表明参考文献[2,3]采用线性模型预测在运动剧烈的图像 MAD 值预测不准确。本文统计了 Foreman 序列第 60~65 帧(目标码率:24 kbps,初始 $QP = 28$)实际 MAD 值与线性预测 MAD 值的误差值,如图 3 所示。

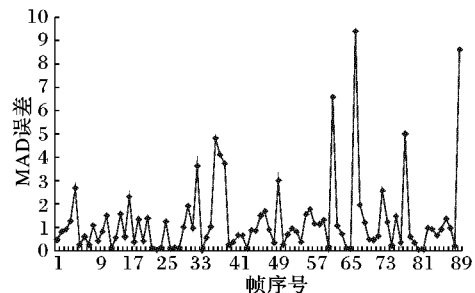


图 3 Foreman 第 60~65 帧实际 MAD 与预测 MAD 误差

本文算法在检测运动剧烈或场景切换图像的前提下,利用图像信息预测实际 MAD 值。由于准确估计 MAD 值,可以优化量化参数以及最佳编码模式选择的拉格朗日参数。

3 流控算法

本文流控算法根据第1章的算法检测到运动剧烈的图像后,使用第2章的算法估计 MAD 值从而优化量化参数以及最佳模式选择的拉格朗日参数。本流控算法由编码前处理、编码过程优化、编码后处理三个部分组成,具体过程如下:

3.1 编码前处理

1) 帧层初始化

文献[3]根据 FC 检测运动剧烈或场景切换的图像。在帧层目标码率分配时,根据 FC 估计当前帧分配 GOP 剩余的比特数。而本文在基于运动检测[3]的基础上,根据同一 FC 区域内相邻图像码率相似的关系,提出一种新的目标码率分配机制。

本文认为图像复杂度与码率之间存在如下关系:同一复杂度区域内连续图像码率相近。

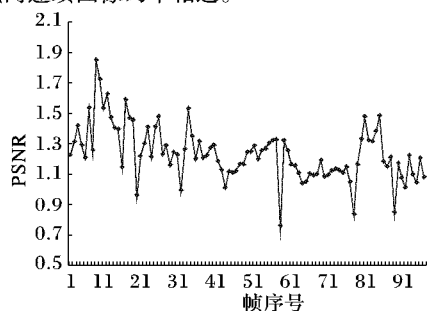


图4 Foreman 序列每帧 FC

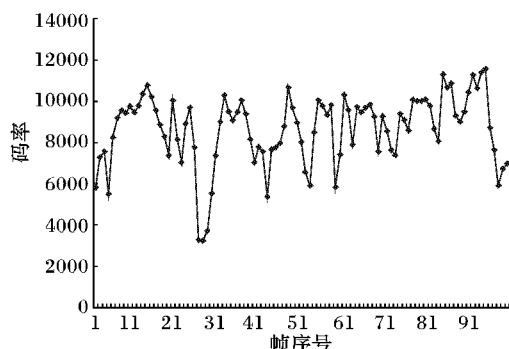


图5 Foreman 序列未流控每帧的码率

图4是Foreman序列内每帧的 FC 的值,图5是Foreman序列没有进行流控时(QCIF, $QP = 28$)每帧的码率。可以看出同一 FC 区域内相邻图像的码率相似。

根据同一 FC 区域内相邻图像码率相似的假设,本文算法在检测到某一复杂度区域第一帧运动剧烈的图像时,根据复杂度 FC 分配目标码率,而该复杂度区域内其他帧的目标码率则用前一帧目标码率与实际编码的码率的差值来调整。

由于本文只对运动剧烈或场景切换的图像处理,所以根据 FC 判决为剧烈图像时将编码标志位设置为 true,否则为 false,并由此标志位判断是否进行编码优化。

编码前码率控制实现过程如下:

1) $1.0 \leq FC \leq 1.5$ 区域并且 $j = 0$ (j 为已编码 P 帧数)目标比特率 T 分配:

$$T_{(i,j)} = \beta \times \hat{T}_{(i,j)} + (1 - \beta) \times \tilde{T}_{(i,j)} \quad (14)$$

其中 (i, j) 表示第 i 个 GOP 第 j 帧; $\hat{T}_{(i,j)}$ 为根据缓冲区实际满度分配的比特数; $\tilde{T}_{(i,j)}$ 为 j 帧分配的当前 GOP 剩余的比特数; β 为权值系数,取值为 0.70^[2]。式(14)的 \tilde{T} 由式(15)得到^[2]:

$$\tilde{T}_{(i,j)} = \mu / F(i, j, r) + \gamma \times (B_{i,j,l} - B_{i,j,e}) \quad (15)$$

其中 $B_{i,j,l}$ 为目标比特量; $B_{i,j,e}$ 为缓冲区实际占用量; γ 为权值系数,取值为 0.75^[2]。式(14)中的 $\hat{T}_{(i,j)}$ 在本文中按照式

(16) 计算:

$$\hat{T}_{(i,j)} = \frac{R_r(i,j)}{N_p} \times \begin{cases} FC, & FC < 1.0 \\ (FC - 1.0) + 0.7, & 1.0 \leq FC \leq 1.5 \\ 1.73, & FC > 1.5 \end{cases} \quad (16)$$

$R_r(i,j)$ 为 GOP 中剩余的比特数, N_p 为 GOP 中剩余的 P 帧。

在 $1.0 \leq FC \leq 1.5$ 区域内为运动剧烈图像,需要编码优化,将编码标志位设置为 true。由于本文采用当前帧目标码率与实际编码码率的差值调整下一帧的目标码率,所以在编码前记录当前帧目标码率:

$$T_{(i,j,l)} = T_{(i,j)} \quad (17)$$

2) $1.0 \leq FC \leq 1.5$ 区域并且 $j > 0$ (j 为第 i 个 GOP 中的第 j 帧)的目标码率 T 分配:

当前帧的目标码率 T 由式(14)计算,此时式(14)中 \hat{T} 如下:

$$\hat{T}_{(i,j)} = \alpha \times \Delta T_{(i,j-1)} \quad (18)$$

$\Delta T_{(i,j-1)}$ 为前一帧目标码率与实际编码比特的差值在编码完每一帧后更新。试验验证 α 取值 0.75 可以取得较好的效果。编码标志设置为 true,通过式(17)记录当前帧目标比特率。

3) $FC > 1.5$ 区域并且 $j = 0$ (j 为第 i 个 GOP 中的第 j 帧)运动目标码率 T 分配:

在此区域限制 $FC > 1.5$ 区域运动剧烈图像目标码率,并且不进行编码优化以免编码码率过大。根据式(14)、(16)分配目标码率。将编码标志位置为 false,通过式(17)记录当前帧的目标码率。

4) $FC > 1.5$ 区域并且 $j > 0$ (j 为第 i 个 GOP 中的第 j 帧)目标码率 T 分配:

通过式(14)分配目标码率,此时式(14)中的 \hat{T} 由式(18)得到。编码标志位设置为 false,通过式(17)记录当前帧的目标码率。

5) $FC < 1.0$ 区域图像目标码率 T 分配:

在该区域内的图像为运动平缓图像,目标码率由式(14)、(16)分配,运动平缓的图像不进行编码优化,编码标志位设置为 false。

6) 宏块层目标码率分配

如果为运动剧烈图像则不进行 MAD 值预测,在编码时根据利用图像信息预测,否则采用线性模型预测。

3.2 编码过程优化

1) 编码标志位为 true:

根据式(12)计算得到当前宏块的 $MAD_{(pred)}$,由式(18)判断宏块的运动剧烈程度:

$$ratio = MAD_{(pred)} / MAD_{(pb)} \quad (19)$$

其中 $MAD_{(pb)}$ 和 $MAD_{(pred)}$ 分别用式(5)、(12)计算得到。

$Ratio > 1.0$ 则根据第2章的优化过程进行优化,否则不进行编码优化。

2) 编码标志位为 false: 不进行编码优化。

3) 编码。

3.3 编码后处理

按照式(20)更新实际编码码率以及目标码率的差值,用于一帧编码初始化分配目标比特流:

$$\Delta T_{(i,j)} = T_{(i,j,l)} - T_{(i,j,e)} \quad (20)$$

其中, $\Delta T_{(i,j)}$ 为当前帧目标比特率与实际编码比特率的差, $T_{(i,j,l)}$ 为当前帧码率控制记录的目标比特率, $T_{(i,j,e)}$ 为当前帧实际编码码率。

本文算法在帧层目标码率分配时,利用了图像复杂度与码率之间的关系,根据实际编码的情况调整目标码率。编码过程

中,在 RDO 后利用图像的信息更加准确地预测了 MAD 。在检测运动剧烈或场景切换图像的前提下,对运动剧烈或场景切换的图像处理降低了本文编码过程优化算法增加的复杂度。

4 实验结果

本文提出的流控算法是在 H. 264 的测试模型 JM8. 6 上

实现的,实验结果与 JVT-G012 和参考文献[3]的算法进行比较。本实验对 7 个序列编码 100 帧进行测试,帧率为 30 fps。实验分别在高码率(目标码率:128 kbps,初始 $QP = 32$)和低码率(目标码率:2 kbps,初始 $QP = 28$)的情况下比较平均 $PSNR$ 值,实验结果如表 1、2 所示:

表 1 低码率(24 kbps@30 fps,初始 $QP = 28$)实验结果

测试序列	平均 $PSNR$ 值 /dB				目标码率 /kbps		
	G-012	本文算法	参考文献[3]	Gain	G-012	本文算法	参考文献[3]
Foreman	23.90	24.60	24.26	0.70	25.71	25.95	26.88
Carphone	28.57	29.35	29.03	0.78	24.19	25.52	25.54
Claire	37.57	37.77	37.45	0.20	24.26	24.32	24.74
News	28.86	29.14	29.02	0.28	24.57	24.81	25.85
Akiyo	33.67	33.74	33.48	0.07	24.19	24.27	24.58
Hall_monitor	30.77	30.96	30.96	0.19	24.21	24.56	24.66
Silent	28.34	28.43	28.41	0.09	24.25	24.63	25.02

表 2 高码率(128 kbps@30 fps,初始 $QP = 32$)实验结果

测试序列	平均 $PSNR$ 值 /dB				目标码率 /kbps		
	G-012	proposed	参考文献	Gain	G-012	proposed	参考文献
Foreman	32.28	32.35	32.30	0.07	128.42	128.79	128.82
Carphone	38.11	38.22	38.17	0.11	128.44	128.46	128.70
Claire	45.22	45.59	45.28	0.37	128.55	128.71	128.74
News	35.76	36.05	35.72	0.29	128.62	128.65	128.67
Akiyo	40.2	40.52	40.34	0.30	128.46	128.48	128.48
Hall_monitor	37.4	37.49	37.42	0.09	128.71	128.87	128.89
Silent	34.15	34.39	34.35	0.24	128.51	128.71	128.76

由表 1、2 可见,本文的码率控制算法在高低码率和高码率下明显地提高运动剧烈的图像的质量。7 个序列的 $PSNR$ 值平均比 JVT-G012 高 0.07 ~ 0.78 dB,比参考文献[3]均有提高。其中 Carphone 序列的 $PSNR$ 值在低码率下比 JVT-G012 高 0.78 dB,Claire 序列的 $PSNR$ 值在低码率下比参考文献[3]高 0.32 dB。

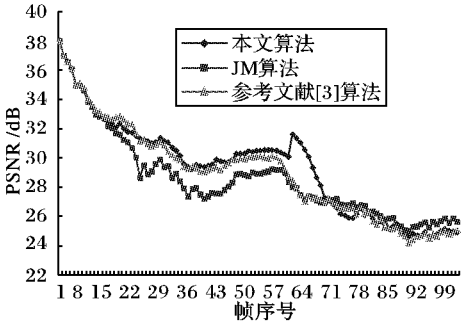


图 6 Carphone 序列 3 种方法下的逐帧 $PSNR$ 比较

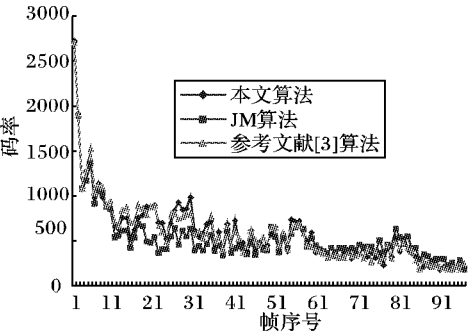


图 7 Carphone 序列 3 种方法下的逐帧码率比较

图 6 和图 7 给出 Carphone 序列在低码率下每帧编码的 $PSNR$ 值以及码率比较。

5 结语

本文对于运动剧烈的图像,利用同一复杂度区域内连续图像码率的相似性,根据前一帧实际码率与目标码率的差值调整当前帧目标码率,准确地进行了流控。在编码时,利用原始图像与预测图像的 SAD 精确估计 MAD 值从而更加准确的估计 QP ,并且充分利用图像信息对每种编码模式进行优化。在本文算法中只针对运动剧烈的图像进行处理,降低了本文编码优化增加的复杂度,并且在尽量保证了平缓图像质量的情况下控制了运动剧烈图像的码率。与 JVT-G012 和参考文献[3]的算法相比,实验表明本算法在高码率和低码率的情况下运动剧烈或场景切换的图像取得较好的质量,平均 $PSNR$ 值最高提高了 0.78 dB。而码率仅比 JVT-G012 略有增加但低于参考文献[3]。

参考文献:

[1] MA S W, GAO W. Rate control on JVT standard, document JVT-S030 [C]// JVT 4th Meeting. Austria: Klagnfurt, 2002.

[2] LI Z G, PAN F, LIM K P. Adaptive basic unit layer rate control for JVT [C]// Pattaya, March, JVT-G012. Thailand: Pattaya, 2003: 7 - 15.

[3] JIANG M Q, LING N. On enhancing H. 264/AVC video rate control by PSNR-based frame complexity estimation [J]. IEEE Transactions on Consumer Electronics, 2005, 51(1): 281 - 286.

[4] YU HONG-TAO. An improved rate control algorithm for H. 264 [J]. IEEE International Symposium, 2005, 1(23 - 26): 312 - 315.

[5] HE Z A. Unified Approach to rate-distortion analysis and rate control for visual coding and communicating [D]. UCSB, 2001.

[6] 李嵩. 一种高效的 H. 264 码率控制方法 [J]. 上海交通大学学报, 2004, 38(11): 1837 - 1840.

[7] 陈川, 余松煜. 联合编码模式选择的码率控制算法 [J]. 电子学报, 2004, 32(5): 763 - 768.