

基于双模预测的精确码率控制

朱仲杰^{1),2)} 白永强^{1),2)} 蒋刚毅³⁾ 梁丰¹⁾

¹⁾(浙江万里学院宁波市 DSP 重点实验室,宁波 315100) ²⁾(郑州大学物理工程学院,郑州 450001)

³⁾(宁波大学电路与系统研究所,宁波 315211)

摘要 精确的码率控制是进行高效视频编码与传输的关键。针对现有码率控制技术的不足,提出了在视频编码中采用两个率失真模型进行码率预测的思想以提高码率控制的精度。对 H.264 的 G012 码率控制框架进行改进,给出一种基于双模预测的自适应码率控制方法。实验仿真结果显示,与传统的单模码率控制方法相比,基于双模预测的码率控制算法能保证在不影响编码质量的前提下有效地提高码率控制的精度。

关键词 码率控制 率失真模型 双模预测

中图分类号:TP391 文献标志码:A 文章编号:1006-8961(2010)04-541-06

Accurate Rate Control by Using Two Rate-distortion Models

ZHU Zhongjie^{1),2)}, BAI Yongqiang^{1),2)}, JIANG Gangyi³⁾, LIANG Feng¹⁾

¹⁾(Ningbo Key Laboratory of DSP, Zhejiang Wanli University, Ningbo 315100)

²⁾(Physical Engineering College, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001)

³⁾(Institute of Circuits and Systems, Ningbo University, Ningbo 315211)

Abstract Accurate rate control is a key technology for efficient video coding and transmission. In view of the drawbacks of existing rate control algorithms, a novel idea that implements rate control by using two rate-distortion models is introduced to enhance the rate-control precision. And a new double model based rate-control algorithm is proposed by adapting the G012 framework of H.264 standard. Experiments are conducted and the results reveal that, compared with the original G012 algorithm, the proposed algorithm can efficiently enhance the rate-control precision without deteriorating the reconstructed video quality.

Keywords rate control, rate-distortion model, prediction with two models

0 引言

码率控制是视频编码与传输中的一项关键技术,也是当前国际视频编码与传输领域中的一个研究热点^[1-2]。虽然严格来说码率控制并不是视频编码标准的一部分,但由于其在视频编码与传输中的重要性,诸多国际视频编码标准都推荐了各自的码

率控制方案,如 MPEG-2 中的 TM5、H.263 中的 TMN8、MPEG-4 中的 VM8 以及 H.264 的 F086 和 G012 等^[3-4]。其中,H.264 的 G012 是当前备受关注并获得广泛应用的一种经典码率控制算法。近年来,国内外有很多学者对其进行了深入研究并提出了诸多改进措施。例如,李慧然等人针对 G012 算法对运动剧烈图像流控效率较低的不足,提出了一种基于图像运动剧烈程度的码率控制方法。该方法

基金项目:国家自然科学基金项目(60692066);浙江省自然科学基金项目(Y107740);浙江省科技攻关项目(2008C31038);宁波市自然科学基金项目(2008A610015)

收稿日期:2008-09-07;**改回日期:**2009-02-19

第一作者简介:朱仲杰(1976—),男。2004年于浙江大学信息与电子工程系获博士学位。主要研究方向为2D与3D视频编码与传输、信息隐藏与版权保护技术、视频语义分析与检索。E-mail: zhongjiezh@hotmail.com

能明显提高运动剧烈或者场景切换时的图像信噪比^[5]。费伟等人假设 H.264 编码后的 DCT 系数服从 Cauchy 分布给出一种新的率失真模型,可以减小码率波动,提高编码后的图像质量^[6]。此外,程波等人针对 G012 算法中 MAD 值之间的时间相关性和空间相关性,提出一种新的 MAD 预测模型,提高了预测效果^[7]。这些改进措施从不同方面提高了码率控制算法的性能,但要在实际应用中获得令人满意的效果,仍需进一步的深入研究^[8-9]。

目前,现有的主要码率控制算法都采用率失真模型来进行码率预测,根据目标码率确定编码参数。因此,率失真模型是码率控制算法中的一个核心与关键部分^[10]。其准确性直接影响到信道带宽资源的利用率和编码后重建图像的视觉质量。因此,如何提高率失真模型的预测精度是提高码率控制算法性能的关键。目前,经典的率失真模型几乎都是建立在假设信源符合某种统计分布特性基础上提出的,但是由于实际视频信源的多样性和复杂性,这些率失真模型难以准确地描述不同特征信源的率失真特性,造成实际编码时码率控制精度出现较大波动。为此,提出了基于双模预测的思想,以提高码率预测的准确性,从而提高码率控制算法的整体性能。

1 率失真模型

目前,码率控制中的率失真模型有很多,包括高斯信源统计模型、对数模型、指数模型、二次模型、基于柯西分布的率失真模型等^[11],其中经典的二次率失真模型得到了广泛应用。该模型是假设信源服从拉普拉斯分布,其率失真函数的解析表达式为^[12]

$$R(D) = \ln\left(\frac{1}{\gamma D}\right) \quad 0 < D < \frac{1}{\gamma} \quad (1)$$

对上式按照泰勒级数展开后有:

$$R(D) = \left(\frac{1}{\gamma D} - 1\right) - \frac{1}{2} \left(\frac{1}{\gamma D} - 1\right)^2 + R(o) = -\frac{3}{2} + \frac{2}{\gamma} D^{-1} - \frac{1}{2\gamma^2} D^{-2} + R(o) \quad (2)$$

令 $Q = D$, 即可得到实际码率控制中广泛使用的二次 $R-Q$ 模型:

$$R(Q) = \frac{\alpha}{Q} + \frac{\beta}{Q^2} \quad (3)$$

式中, α, β 是模型参数。

从上述过程可以看出,模型的推导不是非常严

谨。首先,模型是在假设信源服从拉普拉斯分布的基础上给出的,但实际图像信源的 DCT 系数通常不是严格服从该分布;其次,在式(2)中,展开后的泰勒级数只保留了第一和第二项,高次项被丢弃了,会造成误差;另外,令 $Q = D$ 也不够准确。

为了进一步考察实际视频信号的 $R-Q$ 特性和二次 $R-Q$ 模型的准确性,进行了实验仿真。仿真使用了 Alex, Claire, Train 和 Discus 等十多种测试序列。对每种测试序列分别采用不同量化参数进行编码,得到不同量化参数下的实际码率。同时对实际编码得到的 (R, Q) 数据采用二次模型进行拟合并分析其拟合误差,总共分析了近千张视频图像的 (R, Q) 数据。从仿真结果发现,对于部分视频图像,特别是对使用运动补偿预测编码的 P 帧图像,由于 DCT 变换后的高频系数较少,当量化参数较大时,其实际码率并不随着量化参数的增大明显下降。而二次 $R-Q$ 模型的拟合曲线在尾部的下降速度仍然较快。因此,该模型在实际应用中会存在误差,难以进行精确的码率预测。

基于此,对原二次模型进行了改进,提出一种新的 $R-Q$ 模型,新模型将原二次模型中的第一项中的 Q^{-1} 改成 $Q^{-1/2}$, 同时增加一个常数项 c , 以降低原模型在高量化参数区的衰减速度,更好地逼近实际视频信号的 $R-Q$ 分布。新模型可用下式表示:

$$R = \frac{a}{\sqrt{Q}} + \frac{b}{Q^2} + c \quad (4)$$

式中, a, b, c 为模型系数,可以由如下的统计分析方法给出:

首先,令 $x_1(Q) = \frac{1}{Q^2}, x_2(Q) = \frac{1}{\sqrt{Q}}$, 设, $(x_{11}, x_{21}, R_1), (x_{12}, x_{22}, R_2), \dots, (x_{1n}, x_{2n}, R_n)$ 是已存在的 n 个样本值,令

$$M = \begin{pmatrix} 1 & x_{11} & x_{21} \\ 1 & x_{12} & x_{22} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & x_{1n} & x_{2n} \end{pmatrix} \quad R = \begin{pmatrix} R_1 \\ R_2 \\ \vdots \\ R_n \end{pmatrix} \quad C = \begin{pmatrix} c \\ b \\ a \end{pmatrix} \quad (5)$$

然后,利用多元回归技术,可以计算得到模型参数向量 C 为

$$C = (M^T M)^{-1} M^T R \quad (6)$$

式中, M^T 是 M 的转置矩阵, $(M^T M)^{-1}$ 是 $M^T M$ 的逆矩阵。

图 1 和图 2 给出了 Alex 和 Discus 序列中部分图像的实验仿真结果。其中,图 1 给出了 Alex 序列

中编码为 I 帧的第 1 帧和编码为 P 帧的第 3 帧的实际 $R-Q$ 曲线、原二次模型的拟合曲线和新模型的拟合曲线。图 2 是 Discus 序列中编码为 I 帧的第 1 帧和编码为 P 帧的第 3 帧的实验结果。实验中使用了

0 到 19 共 20 个量化参数。图 1 和图 2 中的横坐标为相应的归一化了量化步长,纵坐标为归一化了的实际码率。从图中可以看出,与原二次模型相比,新模型能更好地逼近实际 $R-Q$ 曲线。

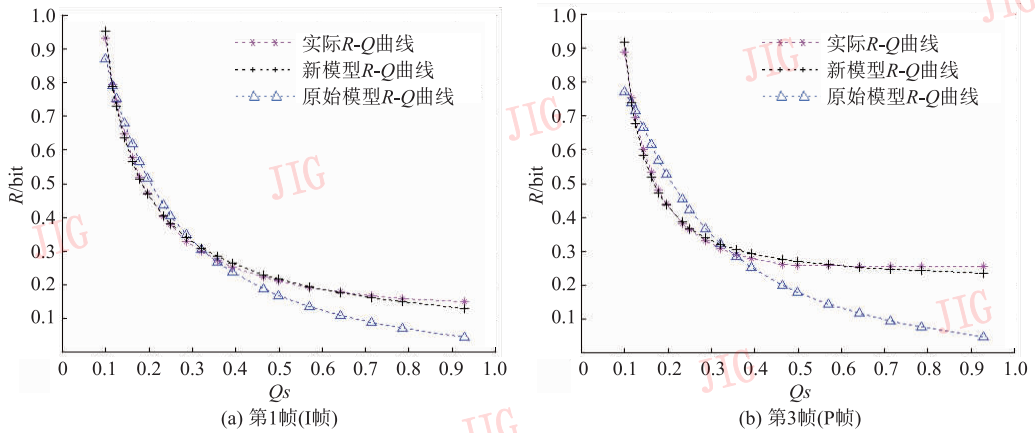


图 1 Alex 序列中部分图片的真实 $R-Q$ 曲线
Fig. 1 Real $R-Q$ curves of some frames in Alex sequence

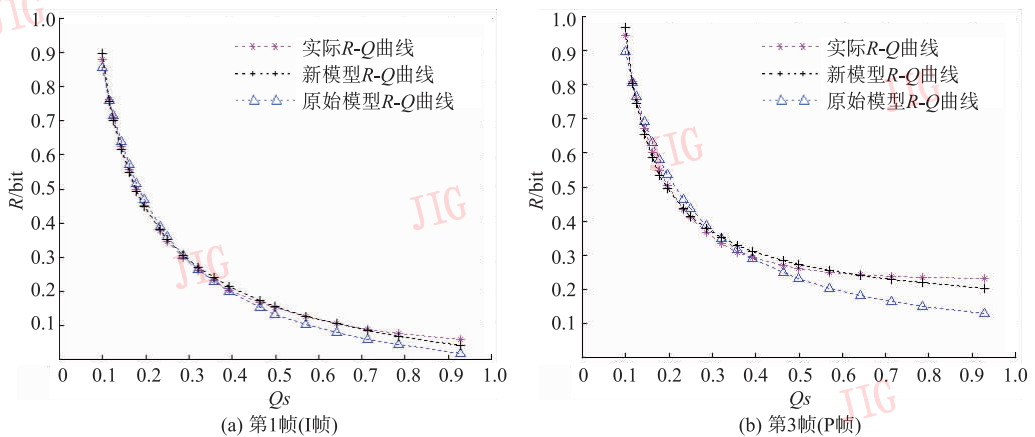


图 2 Discus 序列中部分图片的实际 $R-Q$ 曲线
Fig. 2 Real $R-Q$ curves of some frames in Discus sequence

2 基于双模预测的码率控制

双模预测的基本思想是对视频序列中不同镜头的 GOP 采用不同的率失真模型进行码率预测。为此在编码之前首先要进行镜头检测。本文采用一种基于灰度检测的视频场景切换快速检测方法^[13]。当检测到新的镜头出现时,进行预编码,得到实际的率失真数据,然后分别根据两个率失真模型对实际的率失真数据进行逼近,选择逼近误差最小的率失真模型作为该镜头的实际编码率失真模型。具体选择过程如下:

1) 首先给定一组初始量化参数 $\{Q_1, Q_2, \dots,$

$Q_n\}$ 对各个视频镜头的第 1 个 GOP 进行预编码,得到实际的码率 $\{R'_1, R'_2, \dots, R'_n\}$ 。由 $\{Q_1, Q_2, \dots, Q_n\}$ 和 $\{R'_1, R'_2, \dots, R'_n\}$ 即可得到样本空间为 n 的样本值 $\{(Q_1, R'_1), (Q_2, R'_2), \dots, (Q_n, R'_n)\}$;

2) 利用样本值 $\{(Q_1, R'_1), (Q_2, R'_2), \dots, (Q_n, R'_n)\}$ 对模型 1 和模型 2 分别进行线性回归拟合,分别计算两个模型的参数 $\{\alpha, \beta\}$ 和 $\{a, b, c\}$;

3) 基于模型参数 $\{\alpha, \beta\}$ 和 $\{a, b, c\}$, 根据量化参数 $\{Q_1, Q_2, \dots, Q_n\}$ 分别计算两个模型的预测码率 $\{R^1_1, R^1_2, \dots, R^1_n\}$ 和 $\{R^2_1, R^2_2, \dots, R^2_n\}$;

4) 根据实际码率 $\{R'_1, R'_2, \dots, R'_n\}$ 和预测码率 $\{R^1_1, R^1_2, \dots, R^1_n\}$ 与 $\{R^2_1, R^2_2, \dots, R^2_n\}$ 计算两个模型的

预测误差 δ_{error}^1 和 δ_{error}^2 :

$$\delta_{error}^k = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \text{sqrt}([R_i^k - R_i']^2) \quad k \in \{1, 2\} \quad (7)$$

5) 根据 δ_{error}^1 和 δ_{error}^2 来选择最终编码时使用的率失真模型。

采用双模预测的思想,对 G012 码率控制算法的框架进行了部分修改,提出一种基于双模预测的码率控制算法。受篇幅限制,本文不详细介绍算法的具体步骤,只给出基于双模预测码率控制算法的基本流程,如图 3 所示。

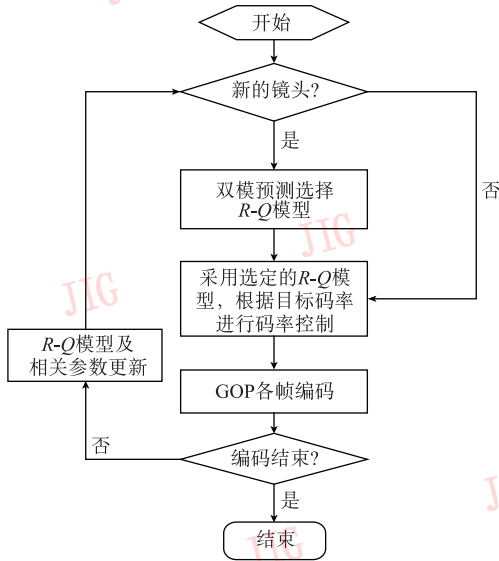


图 3 基于双模预测的码率控制算法流程
g.3 Flowchart of the proposed rate-control algorithm based on two rate-distortion models

3 实验结果

为了检验基于双模预测码率控制算法的性能,进行了实验仿真,重点考察算法的码率控制精度及编码后的图像质量。在实验中,为了对码率控制算法中的镜头检测这一步骤进行简化,人为构造了有明显镜头切换的一段视频测试序列。采取的措施是:首先从 Alex, Claire 和 Train 3 个视频序列中各自截取一段,分别作为 3 个视频镜头组合成一段完整的视频序列,然后在不同的码率下进行编码,分别考察编码后的码率控制精度和编码重建后的视频图像质量。为此,定义如下的码率控制误差 Δ 来衡量码率控制精度:

$$\Delta = |R - R'| / R \quad (8)$$

式中, R 为目标码率, R' 为实际码率。

表 1 至表 4 以及图 4 和图 5 给出了部分实验结果。其中,表 1 和表 2 是 Alex 镜头和 Clair 镜头分别采用不同的率失真模型进行码率控制的结果。表 3、表 4、图 4 和图 5 是整个视频序列分别采用单模算法和双模算法进行码率控制的结果。从表 1 和表 2 可以看出,对不同信源特性的镜头采用不同的率失真模型进行码率控制,其控制精度不同。表 3、表 4、图 4 和图 5 显示,在相同编码速率下,单模算法和双模算法编码后的图像质量基本一致,但采用双模预测的自适应码率控制算法能有效地提高码率控制的精度。

表 1 Alex 镜头码率控制精度 (Δ) (10 GOPs, 编码码率:160 kb/s)

Tab. 1 Rate-control precisions (Δ) of the Alex shot (10 GOPs, bit-rate: 160 kb/s)

| 率失真模型 | GOP 序号 | | | | | | | | | |
|-------|--------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
| 二次模型 | 0.66 | 1.11 | 1.28 | 1.51 | 0.60 | 0.46 | 0.95 | 1.08 | 0.95 | 0.50 |
| 改进模型 | 2.24 | 3.21 | 2.53 | 2.93 | 3.16 | 3.51 | 1.43 | 0.75 | 0.82 | 2.12 |

表 2 Clair 镜头码率控制精度 (Δ) (15 GOPs, 编码码率:160 kb/s)

Tab. 2 Rate-control precisions (Δ) of the Clair shot (15 GOPs, bit-rate: 160 kb/s)

| 率失真模型 | GOP 序号 | | | | | | | | | | | | | | |
|-------|--------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 |
| 二次模型 | 2.71 | 1.33 | 6.67 | 2.20 | 2.87 | 1.15 | 1.62 | 0.73 | 0.42 | 1.18 | 5.90 | 1.32 | 0.49 | 2.38 | 1.88 |
| 改进模型 | 1.04 | 0.18 | 4.15 | 0.74 | 0.93 | 1.47 | 0.08 | 1.92 | 0.12 | 1.11 | 4.37 | 0.57 | 0.40 | 1.12 | 1.09 |

表 3 单模算法与双模算法编码后的码率控制精度 (Δ)

Tab. 3 Comparisons of the rate-control precisions of (Δ) the single-model based algorithm and the double-model based algorithm

| 码率控制算法 | 码率 $R/(kb/s)$ | | | | | | | | 误差均值 /% |
|---------|---------------|------|------|------|------|------|------|------|---------|
| | 190 | 180 | 170 | 160 | 150 | 140 | 130 | 120 | |
| G012 算法 | 1.98 | 0.94 | 2.62 | 1.94 | 1.97 | 2.07 | 2.20 | 4.02 | 2.22 |
| 双模算法 | 1.24 | 0.94 | 0.90 | 0.68 | 0.45 | 0.91 | 1.12 | 2.03 | 1.03 |

表 4 单模算法与双模算法编码后的图像质量 (PSNR)

Tab. 4 Comparisons of the decoded image quality of single-model based algorithm and double-model based algorithm under different bit-rates

| 码率控制算法 | 码率 $R/(kb/s)$ | | | | | | | |
|---------|---------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | 190 | 180 | 170 | 160 | 150 | 140 | 130 | 120 |
| G012 算法 | 37.54 | 36.98 | 36.59 | 35.88 | 35.26 | 34.82 | 34.37 | 33.69 |
| 双模算法 | 37.44 | 36.98 | 36.37 | 35.88 | 35.23 | 34.75 | 34.46 | 34.22 |

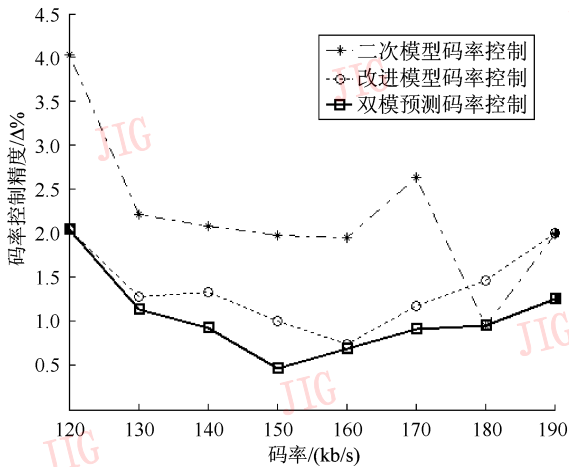


图 4 单模算法与双模算法的码率控制精度

Fig. 4 Comparisons of the rate-control precisions of the single-model based algorithm and the double-model based algorithm

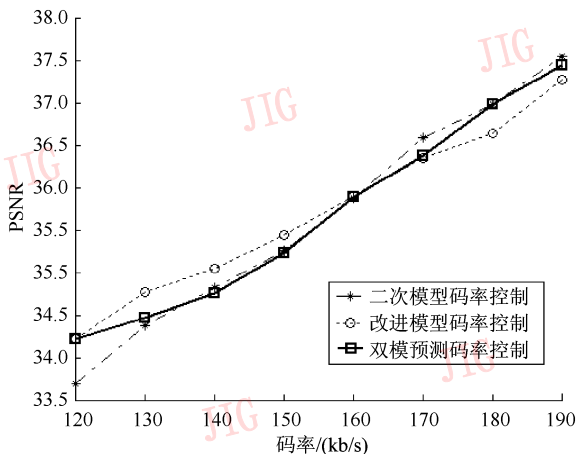


图 5 单模与双模算法在不同码率下编码后的图像质量

Fig. 5 Comparisons of the decoded image quality of single-model based algorithm and double-model based algorithm under different bit-rates

4 结 论

由于视频内容的复杂性和信源特性的多样性,在实际编码中,传统的基于单一率失真模型的码率控制方法往往难以进行精确的码率控制。基于双模预测的码率控制方法,可以根据视频序列中不同视频内容的信源特性来选择不同率失真模型进行码率预测,能有效提高码率控制的精度,同时保持编码后重建视频图像质量基本不变。但与单模算法相比,双模算法复杂度有所提高,特别是在场景频繁切换时编码效率有所降低。因此,接下来将对算法的复杂度进行优化,对算法的鲁棒性进行进一步地深入研究。

参考文献 (References)

- [1] Loren M, Rahul V. Improved Rate Control and Motion Estimation for H. 264 Encoder[C]// IEEE International Conference on Image Processing. Piscataway, NJ: IEEE Press, 2007: 309-312.
- [2] Chen Z Z, Ngan K N. Recent advances in rate control for video coding [J]. Signal Processing: Image Communication, 2007, 22(1): 19-38.
- [3] Zhao Pingfang, Liu Jiwei, Li Qing. A rate control idea and algorithm realization for H. 264/AVC[J]. Computer Engineering, 2006, 32(20): 232-234. [赵平芳,刘冀伟,李擎. 应用于 H. 264/AVC 中的码率控制方案及算法实现[J]. 计算机工程, 2006, 32(20): 232-234.]
- [4] Nejat K, Yucel A L, Russell M M. Frame bit allocation for the H. 264/AVC video coder via cauchy-density-based rate and distortion models[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems

- for Video Technology, 2005, 15(8):994-1006.
- [5] Li Huiran, Peng Qiang, Chen Rui. Novel bit-rate control algorithm for H.264 based on motion detection[J]. Computer Applications, 2008, 28(2):385-388. [李慧然, 彭强, 陈睿. 基于运动检测的 H.264 码率控制的算法[J]. 计算机应用, 2008, 28(2):385-388.]
- [6] Fei Wei, Xu Ping, Zhu Shan'an. Macroblock layer rate control algorithm for H.264 based on Cauchy distribution[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2007, 28(6):1065-1069. [费伟, 徐平, 朱善安. 一种基于 Cauchy 分布的 H.264 宏块层码率控制算法[J]. 仪器仪表学报, 2007, 28(6):1065-1069.]
- [7] Cheng Bo, Chen Zhenyong, Xiong Zhang. Improvement of rate control algorithm in H.264 standard[J]. Computer Engineering and Applications, 2007, 43(24):94-96. [程波, 陈真勇, 熊璋. H.264 视频标准中码率控制算法的改进[J]. 计算机工程与应用, 2007, 43(24):94-96.]
- [8] Jiang M Q, Ling N. Lagrange multiplier and quantizer adjustment for H.264 frame-layer video rate control[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology, 2006, 16(5):663-669.
- [9] Huang Li, Fu Zhizhong. Improvement research based on H.264 TM5 rate control algorithm[J]. Journal of Computer Applications, 2007, 27(3):749-751. [黄莉, 傅志中. 基于 H.264 TM5 码率控制算法的改进[J]. 计算机应用, 2007, 27(3):749-751.]
- [10] Wan Shuai, Chang Yilin, Yang Fuzheng, et al. A new quadratic rate distortion model for video coding and its performance analysis [J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2007, 29(5):1136-1139. [万帅, 常义林, 杨付正, 等. 一种新的视频编码二次率失真模型及其性能分析[J]. 电子与信息学报, 2007, 29(5):1136-1139.]
- [11] Yuan Wei. Research for the Ratio Control Algorithm in H.264 [D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2007. [袁炜. H.264 码率控制算法研究[D]. 合肥:合肥工业大学, 2007.]
- [12] Chiang T, Zhang Y Q. A new rate control scheme using quadratic rate distortion model [J]. IEEE Transactions on Circuit and System for Video Technology, 1997, 7(1):246-250.
- [13] Yu Chengwei, Lu Jianhua, Zheng Junli. Efficient rate control algorithm for H.264 based on scene change detection[J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 2007, 47(7):1133-1136. [余成伟, 陆建华, 郑君里. 基于场景切换的 H.264 码率控制技术[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2007, 47(7):1133-1136.]