

# 符合 DCI 规范的 JPEG 2000 自适应码率控制方法

李 玲<sup>1,2)</sup> 王贞松<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup> (中国科学院计算技术研究所, 北京 100080) <sup>2)</sup> (中国科学院研究生院, 北京 100049)

**摘 要** 为了对码率进行有效控制, 在分析符合 DCI 规范的数字电影制作系统对码率和图像质量需求的基础上, 证明在相同平均码率下, 当压缩图像质量恒定时, 图像序列的平均失真最小。并在 JPEG 2000 码率控制方法的基础上, 提出并实现一种简单有效的基于图像质量和码率约束的自适应码率控制方法。该方法在没有增加计算量的情况下, 首先满足码率阈值要求, 其次满足图像失真阈值要求。实验结果表明, 该自适应码率控制方法, 对于不同类型的图像序列均可很好的满足码率和图像质量的要求, 适用于符合 DCI 规范的数字电影制作系统。

**关键词** 自适应码率控制 数字电影 JPEG 2000 DCI

中图法分类号: TP391 文献标识码: A 文章编号: 1006-8961(2008)01-0040-07

## An Efficient Adaptive Rate Control for JPEG 2000 in Digital Cinema Encoding System

LILing<sup>1,2)</sup>, WANG Zhen-song<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup> (Institute of Computing Technology, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080)

<sup>2)</sup> (Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049)

**Abstract** Digital Cinema encoding system based on DCI specification has special constraints on the bit-rate and image quality of image sequences. In this paper, it is shown that for a given average bit-rate, the average distortion of the image sequence is minimized when the image quality is constant. A simple and efficient adaptive rate control method is proposed, which is based on the PCR-D-opt (post-compression rate-distortion optimization) rate control algorithm of JPEG 2000. Without additional computations, the method could meet the rate and quality constraints. The experiment results show that the proposed method is efficient for different types of image sequences, and it suits for the Digital Cinema encoding system.

**Keywords** adaptive rate control, digital cinema, JPEG 2000, DCI

## 1 引 言

2005 年 7 月, 由迪斯尼、20 世纪福克斯、派拉蒙、索尼电影、华纳兄弟等电影公司组成的数字电影倡导联盟 (digital cinema initiative, DCI) 制定了数字电影系统规范<sup>[1]</sup>。该规范对数字电影内容的控制、分发、播放进行了规定。

与传统的胶片电影不同, 数字电影以数字媒介形式存储, 价格低廉, 后期生产和分发简单; 数字技

术可增强版权保护; 可实现服务器单份拷贝在多台投影仪上同时播放。而且随着高分辨率扫描仪、数字图像压缩、高速数据网络和存储及先进数字投影仪的发展, 数字电影已达到了 35mm 胶片电影的质量, 完全可以取代传统电影, 因此研究数字电影制作系统中图像信号处理相关问题有很大意义。

数字电影制作系统流程, 如图 1 所示, 先对图像序列用 JPEG 2000 压缩算法进行压缩, 再进行加密, 然后对加密后的图像序列和 (加密的) 声音等数据进行打包形成 DCP (digital cinema package) 包。其

基金项目: 国家自然科学基金项目 (69896250-2, 60303017); 国家“863”计划项目 (2003AA135093)

收稿日期: 2006-08-16 改回日期: 2006-09-28

第一作者简介: 李玲 (1982~), 女。现为中国科学院计算技术研究所博士研究生。主要研究方向为数字图像处理和高性能计算。

E-mail: lilin@ict.ac.cn



optimization)算法,其思想是在达到给定压缩比的同时,保证图像失真最小。目前,对于 JPEG2000 码率控制的研究<sup>[3-4]</sup>,均是通过避免对无用数据的系数建模和算术编码来减少运算量、提高运算速度。而关于图像序列自适应码率控制的方法主要有两类。一类是先对图像进行编码,然后根据失真、信道情况等约束,自适应调整传输质量层数或码率<sup>[5-7]</sup>。另一类是对图像编码后,根据信道情况和质量等约束,对下一帧图像的码率进行调整<sup>[8-9]</sup>。上述两类方法均是先完成图像编码后,再对当前图像做二次码率调整或对下一帧图像的码率进行调整。

本文和已有方法不同,通过改进 JPEG2000 压缩算法,在编码的同时完成码率控制,在不增加计算复杂度的情况下,实现了基于图像质量和码率约束的自适应码率控制。

## 2 自适应码率控制方法

### 2.1 恒定图像质量对平均失真的影响

采用 JPEG2000 压缩算法,相同平均码率下,当且仅当压缩图像质量恒定时,图像序列的平均失真最小<sup>[7]</sup>。证明如下:

首先,定义如下符号:

$N$  表示待编码的图像帧数;  $R_{f_i}$  和  $D_{f_i}$  分别表示第  $i$  帧图像  $f_i$  的码率和失真,  $i \in \{1, 2, \dots, N\}$ ;  $\bar{R}$  和  $\bar{D}$  分别表示  $N$  帧图像序列的平均码率和平均失真。

JPEG2000 中单帧图像码率控制算法,求解的是基于图像码率约束,最小化失真问题。以码率  $R_{f_i}$  压缩的单帧图像,其失真可表示为<sup>[10]</sup>

$$D_{f_i}(R_{f_i}) = \prod_{b=0}^{B-1} (G_b W_b \varepsilon_b^2 \sigma_b^2)^{\eta_b} 2^{-2R_{f_i}} \quad (1)$$

上式参数含义如下<sup>[10]</sup>:

$b$  表示子带号;  $B$  表示子带总数;  $G_b$  表示子带  $b$  的逆变换增益;  $W_b$  表示子带  $b$  的失真度权重值,下文仅考虑  $W_b = 1$  的情况;  $\eta_b$  表示变换系数中子带  $b$  所占比例;  $\varepsilon_b$  表示与子带  $b$  相关的一个常数;  $\sigma_b^2$  表示子带  $b$  的变换系数的方差。

如果压缩系统和小波变换及其变换级数不变,对于同一幅图像,不同压缩码率下,式(1)中

$$\prod_{b=0}^{B-1} (G_b W_b \varepsilon_b^2 \sigma_b^2)^{\eta_b} \text{ 为常数, 记作 } \xi。$$

则式(1)可表示为

$$D_{f_i}(R_{f_i}) = \xi 2^{-2R_{f_i}} \quad (2)$$

平均码率  $\bar{R}$  固定不变时,求解平均失真  $\bar{D}$  最小问题,即

$$\begin{cases} \bar{R} = R_{\text{average}} \\ \min(\bar{D}) \end{cases}$$

可用拉各朗日乘法,如下:

$$f(\lambda) = \bar{D} + \lambda \bar{R} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N D_{f_i} + \lambda \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N R_{f_i} \quad (3)$$

$$\bar{R} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N R_{f_i} = R_{\text{average}} \quad (4)$$

式(3)两边对  $R_{f_i}$  求偏导,得到

$$\frac{\partial f(\lambda)}{\partial R_{f_i}} = \frac{\partial}{\partial R_{f_i}} \left[ \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N D_{f_j} + \lambda \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N R_{f_j} \right] = 0 \quad (5)$$

式中,  $i \in \{1, 2, \dots, N\}$ ,  $f_j$  为第  $j$  帧图像。

由式(5)得到

$$\lambda = - \frac{\partial D_{f_i}}{\partial R_{f_i}} \quad (6)$$

将式(2)代入式(6)得到

$$R_{f_i} = \frac{1}{2} \log_2 \frac{2\xi}{\lambda} \quad (7)$$

由式(4)和式(7)得到

$$\lambda = 2 \times \left| \prod_{i=0}^{N-1} \xi \right|^{\frac{1}{N}} \times 2^{-2R_{\text{average}}} \quad (8)$$

将式(8)代入式(7),得到

$$R_{f_i} = R_{\text{average}} + \frac{1}{2} \log_2 \left| \frac{\xi}{\left| \prod_{i=0}^{N-1} \xi \right|^{\frac{1}{N}}} \right| \quad (9)$$

由式(2)和式(9)得到

$$D_{f_i}(R_{f_i}) = 2^{-2R_{\text{average}}} \times \left| \prod_{i=0}^{N-1} \xi \right|^{\frac{1}{N}} \quad (10)$$

由式(10)可知,在 JPEG2000 压缩系统中,基于平均码率约束,当各帧失真相同时,平均失真最小。即平均码率相同时,恒定图像质量压缩,图像序列的平均失真最小。

### 2.2 JPEG2000 中的码率控制

JPEG2000 中的码率控制核心是率失真最优问题,即达到给定码率的同时,失真最小。

为更清楚地说明问题,定义如下:

$K$  表示编码图像中编码块数;  $R_i$  和  $D_i$  分别表示编码块  $i$  的码率和失真,  $i \in \{1, 2, \dots, K\}$ ;  $R$  和  $D$  分别表示编码图像的码率和失真;如果小波变换是正交的,或量化误差是不相关的,则可将重建图像的失真建模为各子带样本的平方误差的线性组合<sup>[10]</sup>。JPEG2000 压缩系统中的小波变换是线性相位对称的,不是完全正交的;并且在低码率压缩时,量化误

差存在一定相关性。假设至少有一个条件是近似有效的<sup>[10]</sup>,则有

$$D = \sum_{i=1}^K D_i \quad (11)$$

$$R = \sum_{i=1}^K R_i \quad (12)$$

JPEG2000 中率失真最优问题,用拉各朗日乘数法求解,如下:

$$f(\lambda) = D + \lambda R = \sum_{i=1}^K (D_i^{(z_i)} + \lambda R_i^{(z_i)}) \quad (13)$$

$$R = \sum_{i=1}^K R_i^{(z_i)} \leq T_R \quad (14)$$

其中,  $z_i$  为编码块  $i$  的截断点,  $T_R$  为给定的码率阈值。

编码块  $i$  的最优截断点集合  $H_i$  中的元素为斜率  $\lambda_i(z_i^j)$  和截断点  $z_i^j$  ( $0 \leq j \leq \|H_i\| - 1$ ),  $\lambda_i(z_i)$  随  $z_i$  单调递减。

$$\lambda_i(z_i^j) = \frac{\Delta D_i^{(z_i^j)}}{\Delta R_i^{(z_i^j)}} = \frac{D_i^{(z_i^{j+1})} - D_i^{(z_i^j)}}{R_i^{(z_i^{j+1})} - R_i^{(z_i^j)}} \quad (15)$$

根据式 (13), 将图像最优问题, 转化为求解每个编码块的率失真最优问题。对于不同的  $\lambda$  利用二分查找法, 在集合  $H_i$  中查找大于  $\lambda$  的最小  $\lambda_i(z_i)$  对应的截断点  $z_i$ , 并且该截断点集  $\{z_i\}$  满足式 (14)。

### 2.3 自适应码率控制方法

如 1 所述, JPEG2000 码率控制是为了取得预期码率, 同时保证图像失真最小。在数字电影制作系统中, 希望在满足单帧图像质量和码率阈值要求的同时, 尽可能减小码率, 并保证相同平均码率下, 图像序列平均失真最小。根据 2.1 节, 相同平均码率下, 每帧图像失真相同时, 平均失真最小。因此, 提出图像质量恒定的自适应码率控制方法。该方法首先满足单帧图像的码率阈值要求, 其次满足图像质量阈值的要求。

图像质量以 PSNR 来表征。以图像质量和码率为约束, 求解图像码率最小时编码块  $i$  的截断点  $z_i$ , 具体方法如下:

根据均方误差与 PSNR 关系, 得到

$$MSE = \frac{(2^B - 1)^2}{10^{T_{PSNR}/10}} \quad (16)$$

其中,  $B$  表示单分量的位深度;  $T_{PSNR}$  表示给定的 PSNR 阈值。

$$T_D = N_1 \times N_2 \times C \times MSE \quad (17)$$

其中,  $N_1, N_2$  分别为图像的高度和宽度;  $C$  为图像分

量数;  $T_D$  表示给定的失真阈值。

基于图像质量和码率约束, 图像码率最小问题, 即

$$\begin{cases} \min(R) \\ R \leq T_R \\ D \leq T_D \end{cases}$$

用拉各朗日乘数法求解, 如下:

$$f(\theta) = \theta D + R = \sum_{i=1}^K (\theta D_i^{(z_i)} + R_i^{(z_i)}) \quad (18)$$

$$D = \sum_i D_i^{(z_i)} \leq T_D \quad (19)$$

$$R = \sum_i R_i^{(z_i)} \leq T_R \quad (20)$$

根据拉各朗日乘数法求解极值, 即对方程求偏导, 得到的偏导数为零。因此, 式 (13) 和式 (18) 取极值时, 应分别满足:

$$\lambda_i = \frac{\partial D_i^{(z_i)}}{\partial R_i^{(z_i)}}, \quad i \in \{1, 2, \dots, K\} \quad (21)$$

$$\frac{1}{\theta_i} = \frac{\partial D_i^{(z_i)}}{\partial R_i^{(z_i)}}, \quad i \in \{1, 2, \dots, K\} \quad (22)$$

由等式 (21) 和式 (22) 可看出, 式 (13) 和式 (18) 取得极值时, 应满足

$$\theta_i = \frac{1}{\lambda_i}, \quad \lambda_i > 0$$

即式 (13) 和式 (18) 取极值时, 率失真斜率相等。

因此, 式 (18) 最小时, 最优截断点  $z_i$  应满足式 (15)。由此可知, 基于图像质量和码率约束的码率最小问题和基于码率约束的失真最小问题, 在编码过程中计算各编码块的最优截断点集合时无差别; 仅在用二分查找法, 寻找满足约束条件的最优解时有差别。

由 2.2 节可知, JPEG2000 在编码时计算各编码块的最优截断点集合, 也即需计算每个截断点与前一截断点的码率差和失真差。因此, 如果已知编码块  $i$  的截断点  $z_i$ , 则可计算得到该截断点处编码块的码率和失真。

根据上述结论, 可直接利用 JPEG2000 编码过程中计算得到的最优截断点集合  $H_i$ , 然后, 利用二分查找法, 寻找满足约束条件 (19) 和 (20) 的截断点集  $\{z_i\}$ 。

本文提出的自适应码率控制方法如下:

- (1) 令  $\lambda_{\min} = 0, \lambda_{\max} = M; M$  依据 JPEG2000 压缩系统实现不同而不同;  $\lambda$
- (2) 令  $\lambda = (\lambda_{\min} + \lambda_{\max}) / 2$
- (3) 当前质量层中编码块  $i$  的截断点  $z_i$  的

$\lambda_i(z)$ 为集合  $H_i$  中大于  $\lambda$  的最小值时, 计算码率  $R$  和失真  $D$ ;

(4) 如果  $(R > T_R)$ , 令  $\lambda_{min} = \lambda + 1$  转到 (8);

\* 当码率大于码率阈值时\*  $\lambda$ ;

(5)  $\lambda_{best} = \lambda$  \* 令最优斜率值为  $\lambda^*$   $\lambda$ ;

(6) 如果  $(D > T_D)$ , 令  $\lambda_{max} = \lambda$  转 (8); \* 当失真大于失真阈值时\*  $\lambda$ ;

(7) 如果  $(D = T_D)$ , 结束; 否则, 令  $\lambda_{min} = \lambda + 1$ ;

(8) 如果  $\lambda_{max} > \lambda_{min}$  转 (2); 否则, 结束。

上述自适应码率控制方法, 可根据对图像质量和码率的要求, 设置 PSNR 阈值 (或失真阈值) 和码率阈值。该自适应码率控制方法可以在原 JPEG2000 码率控制的基础上实现, 没有增加计算量, 对压缩系统的时间性能影响也很小。

如 2.2 节所述, 由于 JPEG2000 压缩系统中, 采用的小波变换, 不是完全正交的, 并且低码率压缩时, 量化误差存在一定相关性, 因此根据式 (11) 计算得到的 PSNR 值与实际值存在误差。我们将从第 3 部分的实验结果看到, 通过式 (11) 计算得到的 PSNR 比实际 PSNR 高约 1dB 左右。

### 3 实验结果

用 PSNR 来衡量图像质量, 图像质量阈值设为 40dB, 码率阈值为 4.5bpp。根据数字电影制作系统的需求, 该自适应码率控制方法, 应首先满足码率阈值要求, 即压缩码率低于等于码率阈值; 其次满足图像质量要求, 即图像质量略高于或等于图像质量阈值。理想情况下, 易于压缩的图像, 其码率应低于码率阈值要求, 而图像质量应略高于或等于图像质量阈值; 而不易压缩的图像, 其码率应约等于码率阈值要求, 而图像质量可能低于或等于图像质量阈值。考虑到 2.3 节中提到的误差, 并且根据下面的实验结果, 将看到压缩后图像序列的 PSNR 值比 PSNR 阈值低 1dB 左右。

实验中, JPEG2000 压缩参数设置均遵循 DCI 规范: 编码块大小为  $32 \times 32$  采用 9/7 小波变换和不可逆色彩变换。其中, 小波变换为 5 级。

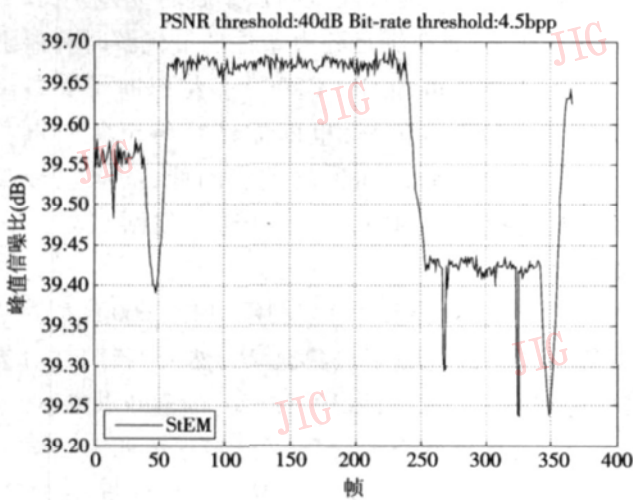
图 3 显示了该方法对彩色图像序列“SEM”的压缩性能。该序列每帧为  $2048 \times 857$  像素点, 每帧量的位深度为 12bits。该序列场景较多, 选取具有



(a) 原始图像序列 (第 78 帧)



(b) 重建图像序列 (第 78 帧)



(c) SEM 图像序列压缩质量



(d) SEM 图像序列压缩码率

图 3 SEM 图像序列压缩性能

Fig 3 The compression performance of the image sequence SEM

代表性的一帧的原始图像及其重建图像,如图 3(a)和图 3(b)所示,视觉无损失。由图 3(d)可看出,采用该自适应码率控制方法得到的压缩图像序列的码率范围为 0.3~2.5bpp 均低于码率阈值 4.5bpp 由图 3(c)可看出,压缩图像序列的 PSNR 值的范围为 39.2~39.7dB,与图像质量阈值的误差在 2.3 节提到的 1dB 误差范围内,满足图像质量阈值要求。

图 4 显示了该方法对彩色图像序列“OldTownCross”的压缩性能。该序列每帧为 1920 × 1080 像

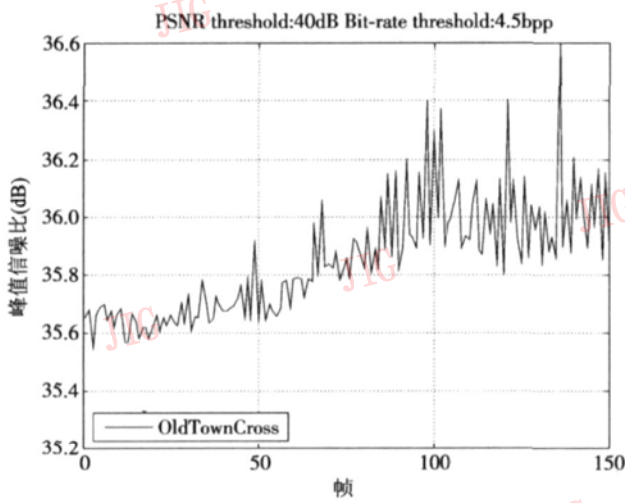
素点,每分量的位深度为 12bits。该序列场景单一,图 4(a)和图 4(b)分别为第一帧的原始图像和最后一帧的重建图像,视觉无损失。由于该序列不易于压缩,由图 4(d)可知,采用该自适应码率控制方法得到的压缩图像序列的码率范围为 4.4995~4.5bpp 均低于等于码率阈值 4.5bpp 基本是恒定码率压缩;由图 4(c)可知,压缩图像序列的 PSNR 值在 35.5~36.6dB 范围内,低于图像质量阈值。



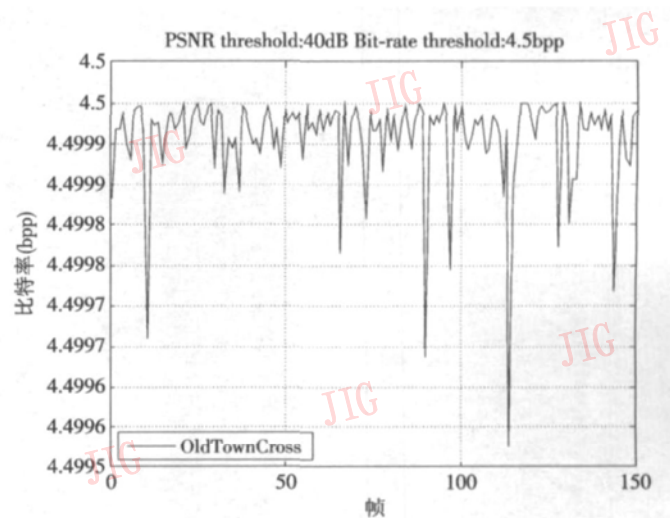
(a) 原始图像序列 (第 1 帧)



(b) 重建图像序列 (最后一帧)



(c) OldTownCross 图像序列压缩质量



(d) OldTownCross 图像序列压缩码率

图 4 OldTownCross 图像序列压缩性能

Fig 4 The compression performance of the image sequence OldTownCross

综上可知,该自适应码率控制方法,对不同类型的图像序列均可很好的满足码率和图像质量阈值的要求,适用于符合 DCI 规范的数字电影制作系统。

### 4 结 论

本文在分析了符合 DCI 规范的数字电影制作系统对码率和图像质量需求的基础上,证明了相同

平均码率下,当且仅当压缩图像质量恒定时,图像序列的平均失真最小。并在 JPEG2000 码率控制方法的基础上,提出并实现了一种简单有效的基于图像质量和码率约束的自适应码率控制方法。该方法在不增加计算量的情况下,首先满足码率阈值要求,其次满足图像失真阈值要求。实验结果表明,采用本文提出的自适应码率控制方法,可有效调整码率,适用于数字电影制作系统。在当前自适应码率控制方法的基础上,还将在以下方面做进一步的工作:评估

量化误差对失真的影响,使由公式计算得到的失真值与实际失真值更接近。

### 参考文献 (References)

- 1 Digital Cinema Initiatives LLC. Digital Cinema System Specifications V1.0[EB/OL]. <http://www.dcinovies.com>, 2005-07-20
- 2 ISO/IEC 15444-1: 2002. JPEG 2000 Image Coding System[S].
- 3 Yu Ya-hui, Tsai Chun-jen. A model-based rate allocation mechanism for wavelet-based embedded image and video coding[A]. In: Proceedings of IEEE International Symposium on Circuits and Systems [C], Kobe, Japan, 2005. 6066~ 6069.
- 4 Masuzaki T, Tsutsui H, Izumi T, *et al*. JPEG2000 adaptive rate control for embedded systems[A]. In: Proceedings of IEEE International Symposium on Circuits and Systems [C], Scottsdale, Arizona, USA, 2002. IV-333~ IV-336.
- 5 Wei Yu, Sahinoglu Z, Vetro A. Energy efficient JPEG 2000 image transmission over wireless sensor networks[A]. In: Proceedings of IEEE Global Telecommunications Conference [C], Dallas, Texas, USA, 2004. 2738~ 2743.
- 6 Itakura E, Futemma S, Wang Gu-rjin, *et al*. JPEG2000 based real-time scalable video communication system over the Internet[A]. In: Proceedings of IEEE 2005 Second Consumer Communications and Networking Conference [C], Las Vegas, Nevada, USA, 2005. 539~ 543.
- 7 Dagher J C, Bilgin A, Marcellin M W. Resource-constrained rate control for motion JPEG2000[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2003, 12(12): 1522~ 1529.
- 8 Nishantha D, Hayashida Y, Hayashi T. Application level rate adaptive motion-JPEG transmission for medical collaboration systems[A]. In: Proceedings of IEEE International Conference on Distributed Computing Systems Workshops [C], Tokyo, Japan, 2004. 64~ 69.
- 9 Hou Jun, Fang Xiang-zhong, Hou Rong. Rate control for motion JPEG2000 using correlation prediction[A]. In: Proceedings of IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing [C], Philadelphia, PA, USA, 2005. 265~ 268.
- 10 David S. Taubman, Michael W. Marcellin. JPEG2000 Image Compression Fundamentals, Standards and Practices[M]. Boston, USA: Kluwer Academic Publisher, 2001: 212~ 379.