

基于 SSE 和 SSIM 的 H.264 帧内预测模式选择改进算法

杨春玲* 肖冬琴

(华南理工大学电子与信息学院 广州 510640)

摘 要: 在 H.264 的帧内预测模式选择过程中, 率失真优化(RDO)的失真测度用当前编码块和预测块之间的平方误差和(SSE)或绝对误差和(SAD)来度量, 而这两种失真测度被证明不能很好地符合人眼视觉(HVS)。该文参考软件 JM16.2, 提出了联合 SSE 和结构相似度(SSIM)作为失真测度用于 RDO 的方法(CSSRDO)。算法首先找到 SSIM 和码率的近似关系, 然后综合以 SSE 作为失真测度的 RDO 函数, 并结合人眼视觉特性, 建立了联合 SSE 和 SSIM 作为失真测度的 RDO 模型。实验表明, 将 CSSRDO 用于 H.264 帧内预测模式选择获得了比 JM16.2 更高的编码效率和更好的重建图像质量。

关键词: 视频编码; 模式选择; 率失真优化; 结构相似度

中图分类号: TN919.81

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2011)02-0289-06

DOI: 10.3724/SP.J.1146.2010.00301

Improvements for H.264 Intra Mode Selection Based on SSE and SSIM

Yang Chun-ling Xiao Dong-qin

(School of Electronic and Information Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China)

Abstract: The distortion metrics Sum of Square Error (SSE) and Sum of Absolute Difference (SAD), adopted in RDO on H.264 reference software, have been proved not correlating well with Human Visual System (HVS). Referring to JM16.2, this paper proposes to Combine SSE and Structural SIMilarity (SSIM) as the distortion metric in RDO (CSSRDO) instead of SSE. Firstly, the algorithm finds the appropriate relationship between SSIM and rate. After utilizing the RDO function where distortion is measured as SSE and considering the HVS, the RDO based on combined SSE and SSIM as the distortion metric is proposed. Further more, CSSRDO is introduced into JM16.2 for intra-mode selection. Results show that the proposed algorithm can achieve better coding efficiency and image quality.

Key words: Video encoder; Mode selection; Rate-Distortion Optimization (RDO); Structural SIMilarity (SSIM)

1 引言

新一代国际视频编码标准 H.264/AVC 代表了目前最先进的视频编码技术, 在同等解码图像质量下, 编码比特率显著降低, 比以往的标准节省码率 50%左右^[1]。

H.264 编码效率的显著提高是因为其采用了许多新的编码技术, 基于率失真优化(RDO)技术的帧内预测模式选择就是其中之一。H.264 支持的帧内预测模式较多, 为确定最佳的预测模式, 在各个版本的参考软件中都使用了 RDO 技术。由于 RDO 算法的复杂度高, 很多文献提出了帧内预测模式选择的快速算法^[2,3], 然而这些算法都是以牺牲解码图像的质量为代价的, 算法的率失真性能损失较大。

RDO 仍然是进行帧内预测模式选择, 较好地取得码率和失真之间的平衡的有效工具^[4,5], 即能在保证图像质量的前提下降低码率。在 H.264 参考软件中, RDO 的失真是用误差平方和(SSE)或绝对误差和(SAD)来度量的, 这两种失真测度同均方误差(MSE)具有相同的物理意义。均方误差和峰值信噪比(PSNR)的优点是其计算复杂度低, 物理意义清晰, 但是它们在有些情况下不能很好地符合人眼视觉特性^[6]。为获得更有效的视频压缩算法, 可以考虑在 RDO 中采用更符合人眼视觉特性的图像失真测度。

在图像质量评价领域, 文献[7]提出了用结构相似度(SSIM)评价图像质量的方法。SSIM 计算简单, 易于实现, 并经大量实验证明能很好地反映人眼视觉感知。由于其更符合人眼视觉特性, SSIM 在业内引起了广泛的研究。在 RDO 中用 SSIM 代替 SSE 作为失真测度, 能获得优于传统的 RDO 的性能, 这在我们早期的工作中已经有所体现^[8,9]。但是, 它

2010-03-26 收到, 2010-06-15 改回

国家自然科学基金(60972135, 60402015)和广东省自然科学基金(06025642)资助课题

*通信作者: 杨春玲 ecelyang@scut.edu.cn

们完全忽略了基于像素误差测度的 SSE 仍然适合于对图像平坦的区域进行误差度量这一事实。也就是说, SSE 能够很好地评判图像平坦区域的质量, 而 SSIM 在边缘和纹理区域表现出良好的评价性能。本文对基于 RDO 的 H.264 帧内预测模式选择进行了深入的研究, 综合 SSE 和 SSIM 的优点, 提出了在 H.264 帧内预测模式选择中, 联合 SSE 和 SSIM 作为失真测度用于 RDO 的算法(CSSRDO), 有效地提高了视频图像的编码效率和视觉质量。

本文内容安排如下: 第2节简单介绍了率失真优化及图像质量评价方法SSIM, 第3节详细描述了本文提出的联合 SSE 和 SSIM 的率失真优化算法(CSSRDO)和其用于H.264帧内预测模式选择的具体步骤, 第4节为本文的实验及结果分析, 第5节给出了结论。

2 率失真优化和 SSIM

2.1 率失真优化(RDO)

在 H.264 帧内编码中, 每帧图像的亮度分量被划分为若干大小为 16×16 的非重叠宏块 (Macro Block, MB), 预测编码的全过程都以宏块为基本单位进行。H.264 参考软件 JM16.2^[5]对亮度 Y 分量提供了 Intra_4×4、Intra_8×8 和 Intra_16×16 三种预测方式, 它们分别包含 9 种, 9 种和 4 种预测模式^[10]。在帧内预测模式选择过程中, 先利用 RDO 代价函数选出每种预测方式的最优模式, 再用代价函数选出整个宏块的最优预测模式。最优预测模式选择过程中用到的 RDO 代价函数定义为

$$J_{\text{SSE}} = D_{\text{SSE}} + \lambda_{\text{SSE}} \cdot R_{\text{MB}} \quad (1)$$

失真 D_{SSE} 是原图像块与重建图像块的误差平方和; R_{MB} 是在相应的预测模式和量化参数(QP)下编码一个图像块所需的码率; λ_{SSE} 是拉格朗日乘子。利用 RDO 代价函数最小原则, λ_{SSE} 可表示为

$$\lambda_{\text{SSE}} = -\frac{\partial D_{\text{SSE}}}{\partial R_{\text{MB}}} \quad (2)$$

在标量量化和熵编码条件下, R_{MB} 和 D_{SSE} 之间以及 D_{SSE} 和 QP 之间的近似关系如式(3), 式(4)所示^[4]。

$$R_{\text{MB}} = a \log_2(b/D_{\text{SSE}}) \quad (3)$$

$$D_{\text{SSE}} = l(2^{(\text{QP}-12)/3}/3) \quad (4)$$

a 和 b 是两个常数, l 是当前编码块中像素的个数。根据文献[4], λ_{SSE} 还可以表述为

$$\lambda_{\text{SSE}} = c \cdot 2^{(\text{QP}-12)/3} \quad (5)$$

在参考软件 JM16.2 中, 当采用率失真优化量化(RDO-Q)^[11]编码 I 帧时, 常数 c 的建议取值为 0.57。

2.2 结构相似度(SSIM)

图像的像素之间是相关的, 这种相关性蕴含着图像的结构信息。在观察图像时, 人眼对场景中结构信息的变化比对单个像素取值的变化更敏感。在此基础上, 文献[7]提出了图像结构相似度的质量评价方法 SSIM, 把对图像结构信息的度量近似为图像感知质量。将原图像块 x 和失真图像块 y 的失真 SSIM 建模为亮度 $l(x, y)$ 、对比度 $c(x, y)$ 和结构信息 $s(x, y)$ 三分量的组合:

$$\text{SSIM}(x, y) = l(x, y) \cdot c(x, y) \cdot s(x, y) \quad (6)$$

亮度、对比度和结构信息是与 x 和 y 的均值 μ_x, μ_y 、标准差 σ_x, σ_y 或协方差 σ_{xy} 有关的量, 表达式分别为 $l(x, y) = \frac{2\mu_x\mu_y + C_1}{\mu_x^2 + \mu_y^2 + C_1}$, $c(x, y) = \frac{2\sigma_x\sigma_y + C_2}{\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + C_2}$, $s(x, y) = \frac{\sigma_{xy} + C_3}{\sigma_x\sigma_y + C_3}$ 。 C_1, C_2 和 C_3 是

为了避免分母为零而添加的小常数^[7]。用 SSIM 评判图像的质量时, 先把图像分成重叠或不重叠的大小相等的子块(一般为 8×8 大小), 然后用式(6)计算每一个子块的 SSIM 值, 再用所有子块 SSIM 值的平均值作为整幅图像质量的度量。SSIM 值越高, 表明失真图像和原图像相似度越高, 失真图像的质量越好。

3 联合 SSE 和 SSIM 的 H.264 帧内预测模式选择

在 RDO 中, 失真测度对其性能有很大的影响。SSE 是一种使用广泛的图像质量失真测度, SSIM 是最近几年发展起来的较符合人眼视觉特性的图像质量评价测度, 它们之间存在很大的相关性^[12], 当然也存在不同。基于像素误差的 SSE 适合于图像平坦区域的质量评判, 但是在边缘和纹理区域不能很好地符合人眼视觉感知, 而反映图像结构信息的 SSIM 对边缘和纹理区域质量的评判优于 SSE。另一方面, H.264 参考软件的 RDO 用 SSE 或 SAD 作为失真测度, 而图像的边缘部分又是人眼比较敏感的区域。基于以上原因, 本文提出联合 SSE 和 SSIM 作为失真测度的率失真优化方法(CSSRDO), 并把它用于 H.264 的模式选择中。基于 SSE 和 SSIM 的率失真代价函数定义为

$$J_{\text{COST}} = (1-w)D_{\text{SSE}} + w \cdot K \cdot D_{\text{SSIM}} + \lambda_{\text{SSE}} \cdot R_{\text{MB}} \quad (7)$$

式(7)中, w 是权重因子 ($w \in [0, 1]$), 用来调节失真 D_{SSIM} 和失真 D_{SSE} 的比重, 其取值与图像块的内容相关。 D_{SSIM} 为结构信息失真, 是一个与 SSIM 相关的量。SSIM 值越大, 表明图像视觉质量越好, 这一

点刚好与误差平方和SSE相反,所以在式(7)中,将失真 D_{SSIM} 定义为 $D_{SSIM} = 1 - SSIM$ 。由2.2节可知,SSIM的取值范围一般为 $[0,1]$,则 $(1 - SSIM)$ 和 D_{SSIM} 是在数量级上差别很大的两个量,因此,在式(7)中,用因子 K 来平衡两者的巨大差异。于是所提CSSRDO算法的关键就是参数 K 和 w 如何取值的问题了。下文通过推导失真 D_{SSIM} 和码率 R_{MB} 之间的近似关系,再综合利用式(1)和式(7)给出的率失真优化模型,得到参数 K 的表达式;权重参数 w 的值则通过大量的实验和分析得到。

3.1 失真 D_{SSIM} 和码率 R_{MB} 的近似关系

我们的前期工作提出了基于SSIM的率失真改进算法(IRDO-SSIM)用于帧内预测模式选择^[9],其采用的获取 D_{SSIM} 和 R_{MB} 之间关系的算法同时也适合于帧内预测^[4,9]。定义基于 D_{SSIM} 的率失真代价函数 J_{SSIM} 为

$$J_{SSIM} = \lambda_{SSIM} \cdot D_{SSIM} + R_{MB} \quad (8)$$

为使代价函数 J_{SSIM} 最小,令 J_{SSIM} 的导数为零,从而得到

$$\lambda_{SSIM} = -\frac{\partial R_{MB}}{\partial D_{SSIM}} = -\frac{\partial R_{MB} / \partial QP}{\partial D_{SSIM} / \partial QP} \quad (9)$$

由式(8)和式(9)可见, D_{SSIM} 和 R_{MB} 关系主要包括两部分,分别是 $\partial R_{MB} / \partial QP$ 和 $\partial D_{SSIM} / \partial QP$ 。在下文中,先推出 $\partial R_{MB} / \partial QP$ 的表达式,再通过实验得到 $\partial D_{SSIM} / \partial QP$,最后得到 λ_{SSIM} 的表达式。

(1) $\partial R_{MB} / \partial QP$ 将式(4)代入式(3)得到 R_{MB} 和QP的关系为

$$R_{MB} = a \log_2 \left(\frac{3b}{l \cdot 2^{(QP-12)/3}} \right) \quad (10)$$

R_{MB} 对QP求导,得到

$$\frac{\partial R_{MB}}{\partial QP} = -\frac{a}{3} \quad (11)$$

接下来要确定参数 a 的值。在式(3)两边对 D_{SSIM} 求导,再将式(4)代入求导后的表达式,得到

$$\frac{\partial R_{MB}}{\partial D_{SSIM}} = -\frac{a}{\ln 2} \cdot \frac{1}{D_{SSIM}} = -\frac{a}{\ln 2} \cdot \frac{3}{l \cdot 2^{(QP-12)/3}} \quad (12)$$

进一步可以得到

$$\lambda_{SSE} = -\frac{\partial D_{SSE}}{\partial R_{MB}} = \frac{l \cdot \ln 2 \times 2^{(QP-12)/3}}{3a} \quad (13)$$

将式(13)与式(5) $\lambda_{SSM} = c \cdot 2^{(QP-12)/3} = 0.57 \cdot 2^{(QP-12)/3}$ 对照,得 $a = l \ln 2 / 1.71$,其中, l 是当前编码块中像素的个数。再将 a 代入式(11)得

$$\frac{\partial R_{MB}}{\partial QP} = -\frac{a}{3} = -\frac{l \ln 2}{5.13} \quad (14)$$

(2) $\partial D_{SSIM} / \partial QP$ 下面将通过实验和分析推算 $\partial D_{SSIM} / \partial QP$ 。大量实验表明,有大量丰富细节的序列适合作为训练序列。实验选取salesman序列作为训练序列。图1的曲线是在参考软件JM16.2^[5]上运行得到的,SSIM值为序列所有帧的平均SSIM值。图1(a)是平均误差(用 $(1 - SSIM) \cdot 10^4$ 表示)和量化参数QP的关系曲线,图1(b)是 $\ln[(1 - SSIM) \cdot 10^4]$ 和QP的关系曲线,可见 $\ln[(1 - SSIM) \cdot 10^4]$ 和QP近似为线性关系,可近似表示为

$$m \cdot QP - \ln((1 - SSIM) \cdot 10^4) + n = 0 \quad (15)$$

用最小二乘法拟合图1(b)中的点,得到 $m = 0.159$, $n = 1.3738$ 。把 m 和 n 的值代入上式,变形得

$$D_{SSIM} = 1 - SSIM = 1 \times 10^{-4} \cdot e^{m \cdot QP + n} \\ = 1 \times 10^{-4} \cdot e^{0.159QP + 1.3738} \quad (16)$$

两边对QP求导,得

$$\frac{\partial D_{SSIM}}{\partial QP} = 0.159 \times 10^{-4} \cdot e^{0.159QP + 1.3738} \quad (17)$$

把式(14)和式(17)代入式(9),得到 λ_{SSIM} :

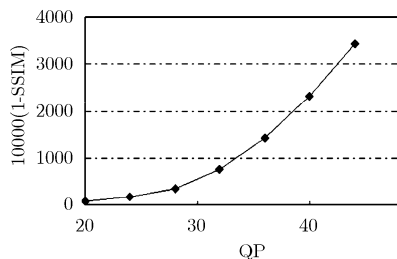
$$\lambda_{SSIM} = \frac{l \ln 2}{0.8157} \cdot 10^4 \cdot e^{-0.159QP - 1.3738} \quad (18)$$

其中, l 是当前编码块中像素的个数。在这里, λ_{SSIM} 是一个与编码块大小以及量化参数QP相关的量。

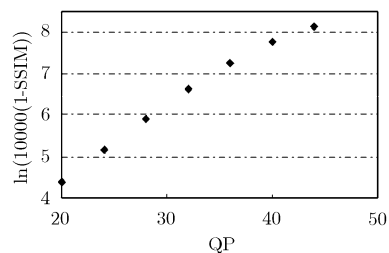
3.2 参数 K 的取值

式(1)和式(8)是分别以SSE和SSIM作为RDO的失真测度的代价函数,它们各自给出了失真 D_{SSM} 和失真 D_{SSIM} 与编码块的码率 R_{MB} 之间的关系。综合式(1),式(7)和式(8),参数 K 可以表示为

$$K = \lambda_{SSIM} \cdot \lambda_{SSM} \quad (19)$$



(a) 10000(1-SSIM)-QP



(b) ln(10000(1-SSIM))-QP

图1 序列“salesman”的 $(1 - SSIM) \times 10^4$ -QPs关系曲线

将式(19)代入式(7), 得到本文所定义的代价函数:

$$J_{\text{cost}} = (1-w) \cdot D_{\text{SSM}} + w \cdot \lambda_{\text{SSIM}} \cdot \lambda_{\text{SSM}} \cdot D_{\text{SSIM}} + \lambda_{\text{SSM}} \cdot R_{\text{MB}} \quad (20)$$

λ_{SSM} 和 λ_{SSIM} 分别由式(5)和式(18)给出, λ_{SSM} 表达式中的参数按参考软件 JM16.2 的建议取值。

3.3 参数 w 的取值

式(20)中的权重因子 w 是一个与图像的局部内容相关的量。图像方差大的区域一般是纹理或边缘, 而且方差很大的区域一般对比度也很大, 而方差小的区域一般是图像中相对平坦的区域。根据人眼视觉特性, 对比度大的区域掩盖误差的能力强, 即误差比较不容易被察觉, 且人眼对图像的边缘区域敏感^[6,13]。因此, 权重 w 在方差非常大或非常小的区域要小一些。根据编码块的方差 σ^2 , 最终确定编码宏块的最优预测模式时的 w 的设置如表 1 所示。由于 Intra_4×4 和 Intra_8×8 的预测方式, 适合于图像内容较丰富的区域^[14], 因此在这两个预测方式的最优模式选择时, 将 w 设置为 0.3。

表 1 参数 w 的取值

σ^2	[0, 200]或(1000, +∞)	(200, 300]或(800, 1000]	(300, 800]
w	0.15	0.2	0.3

3.4 基于 CSSRDO 的 H.264 帧内编码

本节的前 3 小节给出了本文提出的 CSSRDO 率失真优化算法, 并通过详细的推导给出了算法中的参数取值。在 H.264 帧内编码中, 采用 CSSRDO 为每个宏块选择最优预测模式主要有以下 4 步:

第 1 步 最优 Intra_16×16 预测模式的选择, 此步骤与 H.264 原有算法相同。

第 2 步 最优 Intra_4×4 预测模式的选择。把每个宏块的亮度分量分成 16 个 4×4 的非重叠小块, 对于每一个 4×4 块分别用 9 种 Intra_4×4 模式进行预测, 并按式(20)计算每一种模式下的率失真代价, 最小代价函数对应的预测模式为当前编码块最优的 Intra_4×4 模式。

第 3 步 最优 Intra_8×8 预测模式的选择。把每个宏块的亮度分量分成 4 个 8×8 的非重叠小块, 对于每一个 8×8 块分别用 9 种 Intra_8×8 模式进行预测, 并按式(20)计算每一种模式下的率失真代价, 最小代价函数对应的预测模式为当前编码块最优的 Intra_8×8 模式。

第 4 步 整个宏块最优预测模式的选择。按式(20)计算最优 Intra_16×16 模式的率失真代价, 并

和最优 Intra_4×4, Intra_8×8 预测模式的率失真代价比较, 最小代价函数对应的预测模式即为当前编码宏块最优的预测模式。

本文实验仅对亮度分量编码, 采样格式为 4:0:0, 因此在当前编码块的大小分别为 16×16, 8×8 和 4×4 时, 相应编码块的像素数 l 的取值各为 256, 64 和 16。

4 实验结果及分析

4.1 实验环境设置

本文从 3 个方面衡量所提出的率失真优化算法的性能: 每帧图像的编码比特数、重建图像的质量和编码复杂度。实验在国际标准 H.264/AVC 的参考软件 JM16.2^[5]平台上完成, 本文所提 CSSRDO 算法通过修改 JM16.2 实现。实验中, 使用了基于上下文的自适应二进制算术编码(CABAC), 采样格式为 4:0:0, 采用率失真优化量化, 每一个视频序列编码 50 帧。为了比较 CSSRDO 算法和 H.264 算法帧内编码的性能, 实验只做帧内编码, 将所有的编码帧都设置为 I 帧。量化步长 QP 的取值为 QP=20, 24, 28, …, 48。实验过程中, 当编码块尺寸不大于 8×8 时, SSIM 值根据式(6)直接计算, 其他情况下用 8×8 大小的滑动平均模型计算。

4.2 实验结果及分析

在图像/视频质量评判中, SSIM 的性能优于 MSE 和 PSNR^[7,15]。实验中, 用所有解码图像的平均 SSIM 值(MSSIM)来评判解码后视频序列的质量。本实验选用了 4 个视频序列进行试验——两个 CIF 序列“container”和“bus”以及两个 QCIF 序列“grandma”和“news”。图 2 示出了不同算法下这 4 个序列的率失真曲线(只给出了 QP=28, 32, 36, 40 的实验结果), 横坐标为码率, 是平均编码一帧图像消耗的比特; 纵坐标为失真, 用 MSSIM 表示。图中“CSSRDO”表示本文提出的算法, “H.264”表示 JM16.2 的算法。

从图 2 的率失真曲线可以看出, 本文所提 CSSRDO 算法优于 H.264 参考软件 JM16.2 的性能。这主要是因为 JM16.2 中, 帧内编码的 RDO 以 SSE 作为失真测度。SSE 是对像素之间误差的数学统计, 适合于评价图像平坦区域的质量, 但是由于它没有考虑像素间的空间相关性, 也没有考虑人眼视觉特性, 其在图像的纹理以及图像中人眼敏感的边缘区域评判性能不好。而 SSIM 是对图像结构信息的度量, 是一个在图像的纹理和边缘区域均能很好的符合人眼视觉特性的图像质量测度。因此, CSSRDO 算法有效综合了 SSE 和 SSIM 的优点, 取得了比单

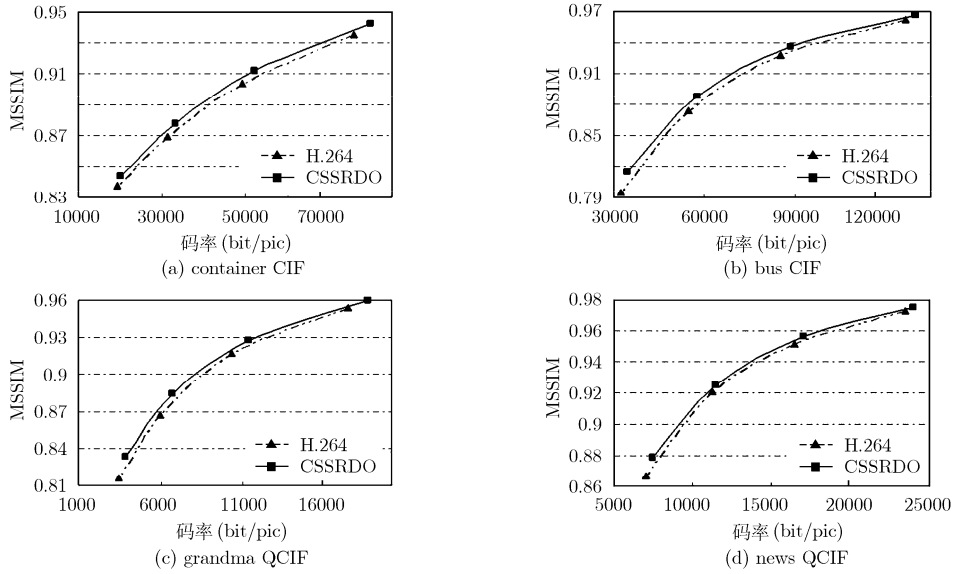


图 2 实验序列的率失真曲线(QP=28,32,36,40)

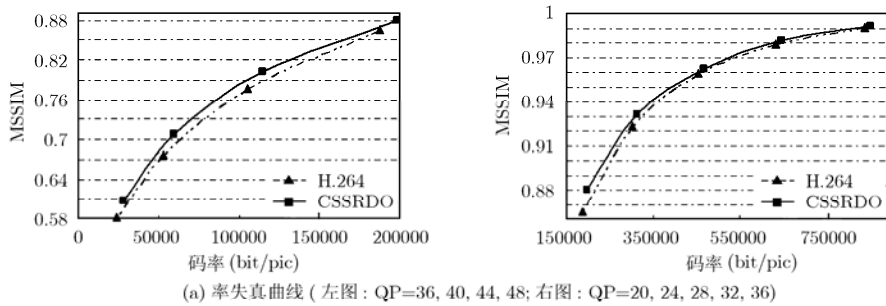
纯基于 SSE 的 RDO 优越的性能。

为了进一步验证算法 CSSRDO, 大尺寸静止图像“painthouse”(512×768)的实验结果示于图 3。图 3(a)比较了 painthouse 在两种算法下的率失真曲线, 图 3(b), 3(c)和 3(d)分别示出了原图和两种算法在相近码率条件下的重建图像。在图 3(c)和 3(d)中可见, CSSRDO 算法的解码图像在房屋的边缘(用①标示)线条清晰, 而 JM16.2 算法的解码图像在房屋的边缘处模糊不清; 标示②和标示③所示部分也可看出, CSSRDO 算法解码图像更加清晰。很明显, CSSRDO 在节省码流的条件下, 获得了 SSIM 值更大、重建质量更好的图像。

下面通过考察编码时间来分析算法的复杂度。表 2 列出了 CIF 序列“bus”和 QCIF 序列“news”的编码时间比较, 其中编码时间为编码 50 帧所用的总时间。可见, CSSRDO 算法的复杂度比 H.264 略有增加, 这是因为 CSSRDO 在 JM16.2 原有算法的基础上增加了计算 SSIM 的部分, 导致总的编码时间有所上升。

5 结论

本文结合人眼视觉特性, 综合图像失真测度 SSE 对图像的平坦区域评判性能良好、SSIM 对图像的纹理和边缘区域评判性能良好的特点, 提出了联



(a) 率失真曲线 (左图: QP=36, 40, 44, 48; 右图: QP=20, 24, 28, 32, 36)

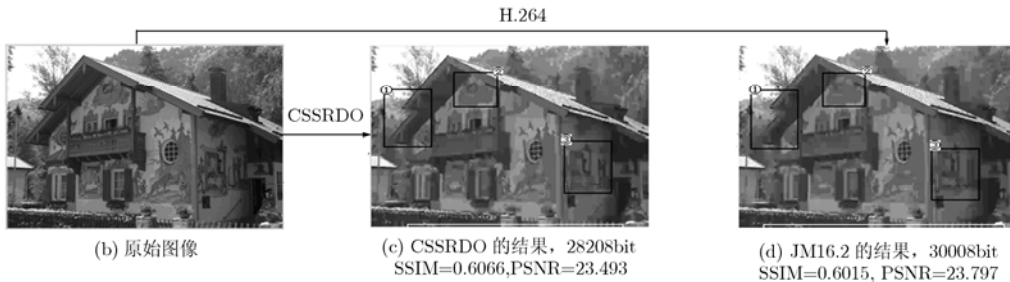


图 3 painthouse 的率失真曲线和重建图像比较

表2 序列“bus”和“news”的编码时间比较

序列	QP	20	24	28	32	36	40	44	48
bus	H.264	178.11	159.76	142.77	127.21	113.94	103.24	95.86	88.82
	CSSRDO	185.95	167.53	152.55	134.66	121.74	111.99	103.47	96.70
	Δ Time(%)	4.22	4.64	6.41	5.53	6.41	7.81	7.35	8.15
news	H.264	38.83	35.41	32.40	29.20	27.18	25.94	24.93	22.11
	CSSRDO	41.36	37.10	33.78	30.91	28.72	26.83	25.17	24.13
	Δ Time(%)	6.52	4.77	4.26	5.86	5.67	3.43	0.96	9.14

合 SSE 和 SSIM 作为失真测度用于率失真优化的算法(CSSRDO), 同时给出了算法中参数的取值, 并将 CSSRDO 用于 H.264 帧内预测模式选择。实验结果表明 CSSRDO 在算法复杂度略有增加的情况下, 性能优于最新的 H.264 帧内编码, 在中低码率时这种改进更明显。由此可见, CSSRDO 算法能获得比 H.264 参考软件 JM16.2 原有算法更高的编码效率和更好的重建图像质量, 其更符合人眼视觉特性。

参考文献

- [1] Wiegand T, Sullivan G J, Bjontegaard G, and Luthra A. Overview of the H.264/AVC video coding standard[J]. *IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology*, 2003, 13(7): 560-576.
 - [2] Jeon Y I, Han C H, Lee S W, and Kang H S. Fast intra mode decision algorithm using directional gradients for H.264[C]. *IEEE International Congress on Image and Signal Processing*, Tianjin, China, 2009: 1-4.
 - [3] 崔玉斌, 蔡安妮. 一种新颖的H.264帧内预测快速算法[J]. *北京邮电大学学报*, 2008, 31(2): 118-122.
Cui Yu-bin and Cai An-ni. A novel fast intra prediction algorithm for H.264[J]. *Journal of Beijing University of Posts and Telecommunications*, 2008, 31(2): 118-122.
 - [4] Li X, Oertel N, Hutter A, and Kaup A. Laplace distribution based lagrangian rate distortion optimization for hybrid video coding[J]. *IEEE Transactions on Circuits and System for Video Technology*, 2009, 19(2): 193-205.
 - [5] Joint Video Team. H.264/AVC reference software JM16.2. <http://iphome.hhi.de/suehring/tml/download>.
 - [6] Lu Q, Du L B, and Xiao X M. An edge weighted RS image quality evaluation method[C]. *IEEE Intertional Conference on Computer Science and Software Engineering*, Wuhan, China, 2008, Vol.6: 197-200.
 - [7] Wang Z, Bovik A C, Sheikh H R, and Simoncelli E P. Image quality assessment: from error visibility to structural similarity[J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2004, 13(4): 600-612.
 - [8] Mai Zhi-yi, Yang Chun-ling, and Xie Sheng-li. Improved best prediction mode(s) selection methods based on structural similarity in H.264 I-frame encoder[C]. *IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics*, Waikoloa, Hawaii, 2005, Vol. 3: 2673-2678.
 - [9] Yang Chun-ling, Leung Rong-kun, Po Lai-man, and Mai Zhi-yi. An SSIM-optimal H.264/AVC inter frame encoder[C]. *IEEE International Conference on Intelligent Computing and Intelligent Systems*, Shanghai, China, 2009, Vol.4: 291-295.
 - [10] ITU-T Rec. H.264/ISO/IEC 14496-10. *Advanced Video Coding for Generic Audiovisual Services*[S]. 2005.
 - [11] Karczewicz M, Ye Y, and Chong I. Rate distortion optimized quantization[C]. *ITU-T SG16 Q.6 Document*, VCEG-AH21, Antalya, Turkey, 2008.
 - [12] Dosselmann R and Yang X D. An empirical assessment of the structural similarity index[C]. *Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering*, Newfoundland & Labrador, Canada, 2009: 112-116.
 - [13] Eckert M P and Bradley A P. Perceptual quality metrics applied to still image compression[J]. *Signal Processing*, 1998, 70(3): 177-200.
 - [14] 毕厚杰. 新一代视频压缩编码标准-H.264/AVC[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2005: 92-95.
Bi Hou-jie. *The New Generation of Video Coding Standard-H.264/AVC*[M]. Beijing, Posts and Telecom Press, 2005: 92-95.
 - [15] Wang Z, Lu L G, and Bovik A C. Video quality assessment based on structural distortion measurement[J]. *Signal Processing: Image Communication*, 2004, 19(2): 121-132.
- 杨春玲: 女, 1970年生, 博士, 教授, 从事图像/视频压缩、图像质量评价方面的研究工作。
肖冬琴: 女, 1985年生, 硕士生, 研究方向为视频编码。