

基于感兴趣区域的 360°全景视频编码

吴志强¹, 郁梅^{1,2}, 姜浩¹, 陈芬¹, 蒋刚毅^{1,2}

¹宁波大学信息科学与工程学院, 浙江 宁波 315211;

²南京大学计算机软件新技术国家重点实验室, 江苏 南京 210093

摘要 针对 360°全景视频在等矩形投影面中编码时存在冗余像素较多且较少考虑感兴趣区域(ROI)画面质量的问题,提出一种基于 ROI 的 360°全景视频编码算法。该算法利用当前帧编码残差信息求取 ROI 并指导下一个帧编码;利用球面到等矩形投影面的映射函数求出各纬度处像素的冗余程度,将其作为非 ROI 量化参数的调节因子,并与 ROI 量化参数调节因子共同决定每帧画面最大编码单元级别的编码参数设置。实验结果表明,在使用加权球面峰值信噪比和球面峰值信噪比全景视频客观评价方法评价编码效果时,与 HEVC 编码器参考软件相比,本文方法码率最高可节省 4.98%,平均码率可节省 2.46%,相同码率下视频质量平均提高 0.145 dB。与相关代表性方法相比,ROI 内容质量明显提升。

关键词 图像处理; 360°全景编码; 等矩形投影; 感兴趣区域; 量化参数; 加权球面峰值信噪比

中图分类号 TN919.8

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP55.061013

360° Panoramic Video Coding Based on Region of Interest

Wu Zhiqiang¹, Yu Mei^{1,2}, Jiang Hao¹, Chen Fen¹, Jiang Gangyi^{1,2}

¹Faculty of Information Science and Engineering, Ningbo University, Ningbo, Zhejiang 315211, China;

²State Key Lab for Novel Software Technology, Nanjing University, Nanjing, Jiangsu 210093, China

Abstract In order to solve the problem that more redundant pixels and less consideration of picture quality of the region of interest (ROI) when the 360° panoramic video is encoded in an equirectangular projection plane. A new ROI-based 360° panoramic video coding method is proposed, which uses the current coding residual frame information to get and guide the next frame coding. The pixel redundancy at each latitude is calculated by the mapping function from the sphere to the projection plane, which is used as the adjustment factor of quantization parameters of non-ROI. The quantization parameters of ROI and non-ROI are utilized to determine each frame's encoding parameters in largest coding unit level. The experimental results show that, compared with the HEVC encoder, for the same weighted spherical peak signal-to-noise ratio and spherical peak signal-to-noise ratio, the proposed approach can achieve an average rate reduction of about 2.46% and the most of 4.98%, for the same coding rate, it can achieve an average video quality increased 0.145 dB. The content of ROI improves obviously compared with the related representative methods.

Key words image processing; 360° panoramic coding; equi-rectangular projection; region of interest; quantization parameters; weighted spherical peak signal-to-noise ratio

OCIS codes 100.2000; 100.3010; 070.2025; 110.3000

收稿日期: 2017-11-23; 收到修改稿日期: 2017-12-25

基金项目: 国家自然科学基金(61671258, 61771269, 61620106012)、浙江省自然科学基金(LY16F010002, LY15F010005, LY17F010005)

作者简介: 吴志强(1991—),男,硕士研究生,主要从事视频编码方面的研究。E-mail: wuzhiqiang1205@126.com

导师简介: 郁梅(1968—),女,教授,博士生导师,主要从事多媒体信号处理与通信方面的研究。

E-mail: yumei2@126.com(通信联系人)

1 引言

近年来,360°全景视频以其高分辨率、沉浸式特点引起了人们的广泛关注^[1],其覆盖水平 360°和垂直 180°拍摄范围,可称之为虚拟现实(VR)或球面全景^[2]。球面全景视频通常是使用多个相机拍摄周围场景后应用视频拼接技术得到一幅具有大视场、高分辨率和沉浸式特点的视频^[3-5]。该视频普遍采用 4 K 或 8 K 的分辨率和支持 10 bit 以上的高动态显示范围^[6],如此高分辨率和像素深度给编码传输带来了新的挑战。

目前针对全景视频的压缩主要分两类:1) 针对用户观看时的视口进行高效压缩;2) 针对等矩形投影面的高效压缩,如对等矩形投影视频^[7]、立方体投影视频^[8]进行压缩。Zare 等^[9-10]提出了针对视口的编码方案,根据视口观看位置分别编码传输该位置所对应的 Tile 块数据,避免了因传输整幅图像而占用过多带宽的问题,但由于对图像中部区域分配较大的码率而上下两部分区域采用较低的码流,会导致观看上下两部分时出现画面质量较差的情况。Budagavi 等^[11]提出将等矩形格式视频基于不同区域采用不同尺度的高斯滤波后再进行编码,其采用的低通滤波会造成画面模糊,对于图像细节部分损伤较大。Li 等^[12]提出将等矩形格式视频按照高度分成三部分,中间部分保持原始宽度,将等矩形投影上下两部分内

容分别压缩成两个圆形。Lee 等^[13]提出将等矩形投影中的像素基于纬度下采样后重新密集排布以减少原等矩形投影存在的冗余像素过多问题,然而,后两种方法都是通过降低等矩形投影面中冗余像素面积以达到提高编码性能的目的,但没有考虑图像压缩过程对人眼较为关注区域画面质量造成的影响。

对全景视频的研究目前大都局限于上述两个方向,却鲜有利用视觉感知特性进行 360°全景视频编码的研究。考虑到大部分全景视频存在相机固定拍摄,画面内容和场景的背景较简单这一特点,本文提出一种基于感兴趣区域(ROI)的 360°全景视频编码方法,该方法使用编码残差信息提取 ROI,利用从球面投影到等矩形平面后不同纬度处存在不同程度的像素冗余作为非 ROI 量化参数的调节因子,使用 360°全景视频质量评价方法——加权球面峰值信噪比(WS-PSNR)^[14]、球面峰值信噪比(S-PSNR)^[15]以及基于结构相似性的结构相似性(SSIM)^[16]进行客观质量评价。结果显示,本文方法能够实现视频数据进一步压缩,同时能够显著提高 ROI 画面质量。

2 基于 ROI 的 360°全景视频编码方法

针对目前全景视频编码过程较少考虑保护 ROI 区域质量的问题,提出一种基于 ROI 的 360°全景视频编码方法,其算法框架如图 1 所示,主要包括三部分,即利用上一帧编码残差信息提取 ROI 以及

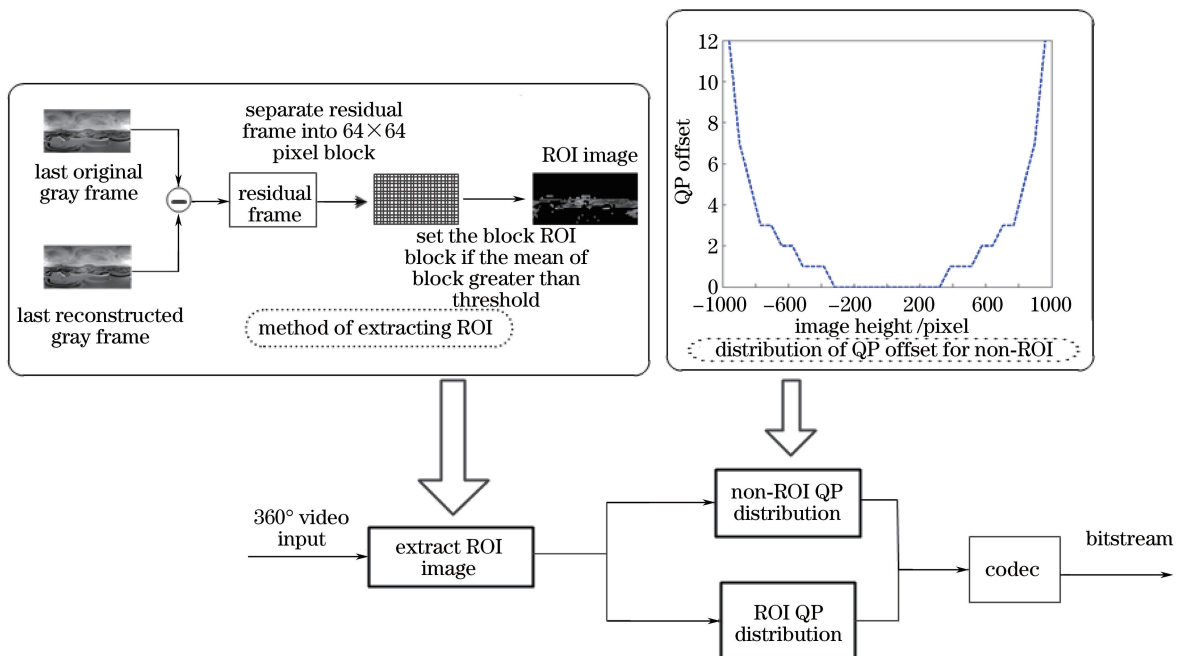


图 1 基于 ROI 的 360°全景视频编码框架

Fig. 1 Framework of 360° panoramic video coding based on ROI

对 ROI 和非 ROI 的量化参数(QP)分配策略。首先利用前一帧编码残差信息提取 ROI 指导当前帧编码,对提取的 ROI 采用较小的 QP;对非 ROI,利用球面投影到等矩形平面的映射函数作为该区域的 QP 分配因子。

2.1 360°全景视频中 ROI 提取

现有的全景视频拍摄主要分为相机位置固定和可移动两类。如图 2 所示,如果是室外拍摄,视频顶

部是天空,视频底部是地面。在 building 序列中,观看者主要关注靠近赤道区域的房屋以及下部移动的人物;在 glacier 序列中,山顶、雪的反光区域和脚印比较具有吸引力。相对于非 ROI,观看者对 ROI 的失真更敏感,若能在编码过程中分配更多的码率给 ROI,同时适当降低非 ROI 的码率,则能够在整幅图像基本码率不增加的情况下,获得主观质量更好的图像^[17]。

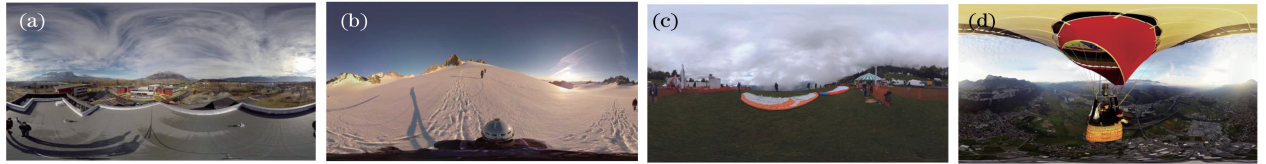


图 2 360°全景图展示^[18]。(a) Building 序列(相机固定);

(b) glacier 序列(相机可移动);(c) jump 序列(相机固定);(d) ballooning 序列(相机可移动)

Fig. 2 360° image sequences. (a) Building sequence for camera fixed; (b) glacier sequence for camera not fixed;

(c) jump sequence for camera fixed; (d) ballooning sequence for camera not fixed

全景视频画面中大部分区域是天空、地面这些纹理比较简单的区域,相比之下人眼更关注,纹理较复杂的区域。针对全景视频具有如此特点的 ROI,首先求取一帧原始图像的灰度图 O_{gray} 与其经过 HM 平台编码后得到的灰度图 R_{gray} 的残差图像 R_{gray} ,考虑到高效率视频编码(HEVC)是以 $64 \text{ pixel} \times 64 \text{ pixel}$ 的最大编码单元(LCU)为单位对视频编码,所以将 R_{gray} 以 $64 \text{ pixel} \times 64 \text{ pixel}$ 大小进行分块。若 $E_{64 \times 64}^n > \tau$,则

标记该块为 ROI 块,其中 $E_{64 \times 64}^n$ 表示 R_{gray} 中第 n 块的均值, τ 为预先设定的阈值。遍历所有块后得到整幅图像的 ROI 块。图 3 给出了图 2 中全景视频序列提取 ROI 后的效果图,其中,图 3(a)提取房屋、人以及远处的火山等区域;图 3(b)提取人、雪地中反光区域和脚印区域以及远处雪山等较引起关注的区域。由图 3 可知,该算法可以有效提取全景图中的 ROI。

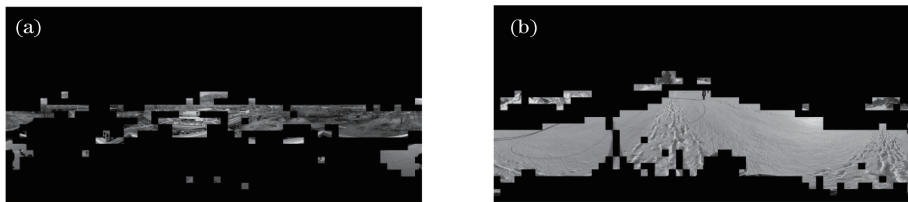


图 3 ROI 提取效果。(a) Building 序列;(b) glacier 序列

Fig. 3 Extracting results of ROI. (a) Building sequence; (b) glacier sequence

2.2 ROI 的 QP 分配策略

由于编码参数 QP 的调整直接影响重建视频的质量,所以 ROI 应该分配更多的码流以保证画面质量。ROI 设置统一的 QP 值,容易导致 ROI 块与非 ROI 块之间出现明显的块效应,并且 ROI 内部也应该具有不同的感兴趣程度。基于该思路,本文方法采用 ROI 区域 $Q_{offsetn}$ 分配策略:

$$Q_{offsetn} = \begin{cases} -2, & E_{64 \times 64}^n \geq \tau_3 \\ -1, & \tau_2 \leq E_{64 \times 64}^n < \tau_3, \\ 0, & \tau_1 \leq E_{64 \times 64}^n < \tau_2 \end{cases} \quad (1)$$

式中 $Q_{offsetn}$ 为第 n 个块对应的 QP 偏移值, τ_1 、 τ_2 和 τ_3 分别为 3 个级别的阈值, $\tau_1 < \tau_2 < \tau_3$ 。比较

当前块 $E_{64 \times 64}^n$ 值与阈值 τ_i 的大小,然后分配该 ROI 块对应的 $Q_{offsetn}$ 值,通过设置多个级别的阈值 τ_i 提取多个层次的 ROI,并对不同层次的 ROI 块分别分配差别较小的 QP 值,以避免不同级别的 ROI 块之间以及 ROI 块与非 ROI 块之间出现明显的块效应。

2.3 非 ROI 的 QP 分配策略

球面投影到等矩形平面后,由于各个纬度采用不同程度像素采样,等矩形平面中不同区域存在不同像素冗余,等矩形投影中不同高度处像素冗余程度可以用 $1/\cos \theta$ 衡量^[14,19], $\theta \in [-\pi/2, \pi/2]$,表示图像区域范围,上下部分分别对应 $\pm \pi/2$ 。低纬度

处 $1/\cos\theta$ 较小,代表像素冗余较小,对应分配较小的量化步长;高纬度处 $1/\cos\theta$ 较大,代表像素冗余较大,则设置较大的量化步长。所以量化步长 Q_{step} 为关于 $1/\cos\theta$ 的函数,调节 Q_{step} 需要间接调节 QP,若通过配置文件设置一个全局 QP 后,不同纬度相对赤道处存在一个 QP 偏移值(Q_{offset}),设置该 Q_{offset} 即可保证各个纬度处具有相似的量化失真。HEVC 中两者的关系及其变换形式分别为

$$Q_{\text{step}} = 2^{\frac{QP-4}{6}}, \quad (2)$$

$$Q_{QP} = 4 + 6 \log_2(Q_{\text{step}})。 \quad (3)$$

仿照(3)式,设 Q_{offset} 为关于 $1/\cos\theta$ 的对数函数,有

$$Q_{\text{offset}} = 2 \log_2[\cos(\theta)]。 \quad (4)$$

为了与提取 ROI 一致,只求取每个块左上角处的 Q_{offset} ,则有

$$Q_{\text{offset}} = \begin{cases} \text{around}\{2 \log_2[\cos(n\pi)]\}, & \text{if } 2 \log_2[\cos(n\pi)] < 12, \\ 12, & \text{others} \end{cases}, \quad (5)$$

式中 $n = h/H$, h 为每个块左上角的纵坐标值, H 为图像高度,设图像中间处 $h = 0$,图像上半部分 $h > 0$,下半部分 $h < 0$, $n\pi \in [-\pi/2, \pi/2]$, $\text{around}(\cdot)$ 表示四舍五入。设置图像中每个块的 Q_{offset} 时,考虑到设置过大的 Q_{offset} 会严重影响主观质量,所以限制 Q_{offset} 取值不超过 12。根据(3)式绘制图像,结果如图 4 所示,蓝色线段为各个纬度处的 Q_{offset} ,赤道处 $Q_{\text{offset}} = 0$,赤道处 QP 的编码通过配置文件设置。至此完成了非 ROI 的 QP 分配。

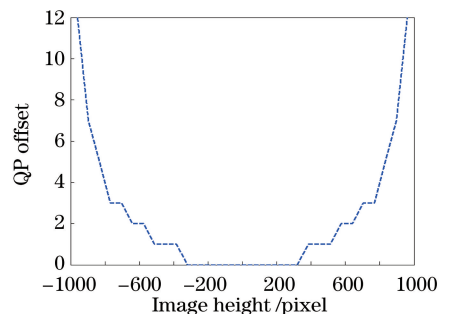


图 4 分辨率为 $3840 \text{ pixel} \times 1920 \text{ pixel}$ 的图像 QP 偏移值
Fig. 4 Distribution of QP offset for image with resolution of $3840 \text{ pixel} \times 1920 \text{ pixel}$

3 实验结果与分析

为了验证算法的有效性,分别实现 HM15.0 标准测试平台编码和经本文方法改进的 HM15.0 平台,全帧内编码模式下以原 HM15.0 标准测试平台实现的结果作为比较。QP 依次设置为 22、27、32

和 37,使用图 2 所示的 4 个来自 GoPro 提供的具有代表性的全景视频序列^[18]进行测试,4 个序列分别包含“镜头固定”和“镜头可移动”两类特征,每个序列编码 100 帧。表 1 给出了实验所用序列的详细信息。

表 1 全景视频序列信息^[18]

Table 1 Panoramic video sequence information

Sequence	Sequence name	Resolution / (pixel \times pixel)	Frame rate	Bit-deep	Does the camera move?
Building	timelapse_building_vr_25p_3840 \times 1920.yuv	3840 \times 1920	25	8	No
Jump	timelapse_basejump_vr_25p_3840 \times 1920.yuv	3840 \times 1920	25	8	No
Glacier	glacier_vr_24p_3840 \times 1920.yuv	3840 \times 1920	24	8	Yes
Balloning	ballooning_vr_25p_3840 \times 2160.yuv	3840 \times 2160	25	8	Yes

每个序列第一帧使用 HM15.0 标准测试模型编码,从第二帧开始使用所提算法进行编码。首先提取 ROI 并分配对应级别 ROI 的相应 Q_{offset} 。一般纹理复杂区域即为人眼 ROI,该区域存在较多高频分量,经编码后高频分量损失严重,从而导致该区域编码残差较大。本文利用 ROI 编码后残差较大的特点提取 ROI,经大量实验发现, ω 设置为 1.7 倍整幅残差图像均值时能较好地提取全景视频中的 ROI;而 ω 取值过小时,提取的 ROI 面积过大,进而导致包含的非 ROI 面积增大影响编码效果。设置

提取不同级别 ROI 的阈值, ω_1 、 ω_2 和 ω_3 分别等于 1.7 倍、1.9 倍和 2.1 倍整幅残差图像均值,3 个等级阈值提取出的对应 ROI 面积依次变小,其实质是所提取 ROI 区域对应的残差越来越大,残差越大说明对应的纹理越复杂,纹理复杂的区域在编码过程中应该使用较小的 QP 来保护其高频分量,所以 3 个阈值给 ROI 中不同纹理复杂区域分配不同的 QP,可以进一步提高编码效率。

接着基于纬度调整非 ROI 的 Q_{offset} ,至此 ROI 和非 ROI 的 QP 分配结束。然后对 ROI 与非 ROI

进行编码,解码得到当前帧,重建后利用编码残差信息指导下帧 ROI 提取。

本文编码方案目标是保证视频感知质量不下降的情况下,降低视频编码的码率。表 2 给出了本文方法与原始 HM15.0 平台的对比结果,分别使用峰值信噪比(PSNR)、WS-PSNR 和 S-PSNR 等客观评价方法验证算法的有效性,采用类似 BDBR 评价方

表 2 本文方法和原始 HM15.0 平台的对比结果

Table 2 Comparison results of proposed method and original HM15.0

Sequence	PSNR		WS-PSNR		S-PSNR	
	BD-PSNR /dB	BD-rate /%	BD-WS-PSNR /dB	BD-rate /%	BD-S-PSNR /dB	BD-rate /%
Building	-0.1788	4.0026	0.0735	-1.5160	0.0648	-1.2634
Glacier	0.1044	-1.6704	0.3222	-4.9822	0.3388	-4.9103
Jump	-0.2040	5.3328	0.0875	-2.1715	0.0807	-1.8890
Ballooning	-0.3383	5.3488	0.0993	-1.5317	0.0947	-1.3998
Average	-0.1542	3.2534	0.1456	-2.5504	0.1448	-2.3656

S-PSNR 是针对 360°全景视频提出的一种客观质量评价方法,使用 S-PSNR 进行评价时,首先从球面上选取 655362 个均匀分布的采样点,利用采样点计算 S-PSNR,对于球面上的采样点 s ,分别找到在原投影面和经编码后投影面所对应的 g 点和 q 点,然后计算像素值后求取差值,对所有采样点重复上述操作,即可求得 S-PSNR。如果采样点 s 映射到 g 或 q 不是整像素对应关系,则要引入两次插值算法。WS-PSNR 也是针对 360°全景视频提出的一种客观质量评价方法,S-PSNR 使用有限个像素点和需要使用两次插值,而 WS-PSNR 根据球面投影到等矩形平面的过程中各个纬度存在的像素冗余程度和物体形变,赋予等矩形平面不同高度像素以不同的权重值,这样不同像素就具有不同的权重。

从表 2 可以看出,使用 WS-PSNR 和 S-PSNR 进行编码质量衡量时,相同的客观质量条件下,本文方法比原始编码平台能够实现最多 4.98% 和 4.91% 的码率节省,以及平均 2.55% 和 2.37% 的码率节省,客观质量平均提高 0.145 dB;使用 PSNR 衡量球面视频编码性能时,出现了相同客观质量条件下平均 3.25% 的码率上升和 0.15 dB 的质量下降。由于全景视频在观看时并不是直接在二维等矩形投影面,而是需要将二维等矩形投影面反向投影至球面,所以使用原始二维投影视频与编码重构二维投影视频计算得到的 PSNR 并不能反映球面视频编码质量,这也说明传统 PSNR 已不适应评价 360°球面全景视频编码性能。而 S-PSNR 和 WS-PSNR 直接或间接计算编码重构视频在球面上的质量,所以更加适合作为球面视频的客观评价方法。另外,从表 2 可

法分别在 PSNR、WS-PSNR 和 S-PSNR 下比较其率失真性能。其中,BD-PSNR 表示相同码率的情况下,本文方法比 HM15.0 平台提升的质量,该值越大,表示质量提升越多;BD-rate 表示相同 PSNR 下,本文方法比 HM15.0 所节省的码率,绝对值越大,说明本文方法相同 PSNR 下节省的码率越多。WS-PSNR 和 S-PSNR 下的评价方法类似于 PSNR。

以看出,本文算法对相机固定拍摄类的视频和相机移动拍摄类的视频均具有较好的编码性能。

为了检验算法对视频的感知质量的提升效果,对比本文方法与文献[20]方法,结果如表 3 所示。可见,无论是利用 WS-PSNR 还是 S-PSNR 来衡量编码质量,本文方法都能取得更好的编码效果。引入基于 SSIM 进行比较,SSIM 作为一种评价结构失真的视频质量客观评价方法,计算公式为

$$S_{SIM} = l(x, y) \times c(x, y) \times s(x, y) = \left(\frac{2\mu_x\mu_y}{\mu_x^2 + \mu_y^2 + c_1} \right) \left(\frac{2\sigma_{xy} + c_2}{\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + c_2} \right), \quad (6)$$

式中 x 和 y 分别为原始图像块和编码重建图像块, $l(x, y)$ 、 $c(x, y)$ 和 $s(x, y)$ 分别表示亮度、对比度和结构信息, μ_x 和 σ_x 、 μ_y 和 σ_y 分别为原始图像块、编码重建图像块的均值和方差, σ_{xy} 为原始图像块和编码图像块的协方差, c_1 和 c_2 为调节常数。SSIM 取值越接近于 1,表示两幅图像在主观质量上越相似。分别计算本文方法、文献[20]算法的解码视频与原视频序列的 SSIM 值,并利用 BDBR 方法进行比较。

表 3 本文方法和文献[20]方法的对比结果

Table 3 Comparison results of proposed method and Ref. [20]

Sequence	WS-PSNR	S-PSNR	SSIM
	BD-rate	BD-rate	BD-rate
Building	-0.1760	-0.3264	-5.5388
Glacier	-0.4900	-0.5380	-6.4314
Jump	-0.6295	-0.6870	-1.1770
Ballooning	-0.8787	-0.8943	-1.6454
Average	-0.5436	-0.6114	-3.6982

由表 3 可知,在相同 SSIM 值的情况下,本文方

法最高实现了 6.4% 的码率节省, 平均节省 3.7% 的码率, 说明在相对原视频序列具有相同结构相似度的条件下, 本文方法比文献[20]算法更有效地节省了

了编码码率。充分证明本文方法能够有效实现码率节省, 同时也验证了在降低码率的同时能够更好地保持视频中结构相似性。

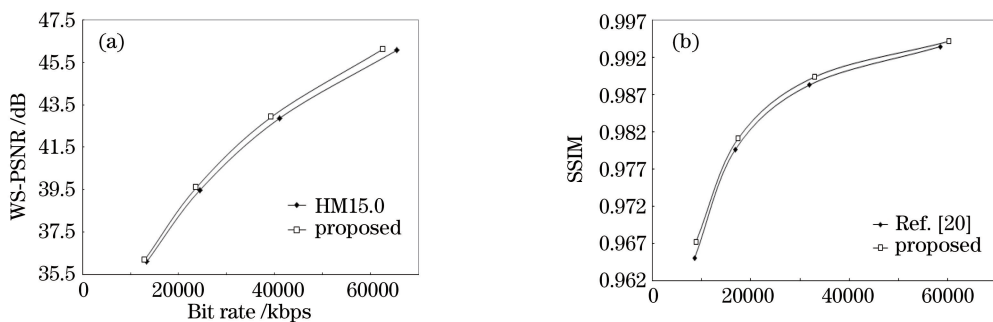


图 5 部分序列率失真性能。(a) Glacier 序列; (b) building 序列

Fig. 5 BD-rate performance of glacier and building sequences. (a) Glacier sequence; (b) building sequence



图 6 Glacier 序列第 8 帧原始图及 ROI 局部放大图。

(a) 原始视频; (b) 局部视口放大图; (c) HM15.0 重建帧; (d) 本文算法重建帧

Fig. 6 Local enlarged drawing of ROI and original 8th frame of glacier sequence. (a) Original frame; (b) enlarged drawing of local viewport; (c) reconstructed frame using HM15.0; (d) reconstructed frame using proposed method

图 5 所示为 glacier 序列和 building 序列在本文方法与 HM15.0 以及本文方法与文献[20]算法下的率失真性能。可见, 本文算法的率失真性能优于 HM15.0, 利用 SSIM 进行客观评价时, 本文方法的率失真性能也优于文献[20]算法。

图 6 为 glacier 序列第 8 帧原始图及 ROI 局部放大图。图 6(c) 为 HM15.0 重建帧, 其中 QP 为 22, 码率为 2554.8 kbits, WS-PSNR 为 46.209 dB, 局部视口 PSNR 为 44.114 dB; 图 6(d) 为本文算法重建帧, 其中 QP 为 22, 码率为 2483.7 kbits, WS-PSNR 为 46.318 dB, 局部视口 PSNR 为 44.223 dB。由图 6(c)、(d) 可知, 本文方法能够在更低码率下实现更高的客观质量, 同时对局部 ROI 细节区域保护更好, 验证了本文方法不仅能够有效提取 ROI, 并且能够对 ROI 更好地进行细节保护。综上, 本文方法实现了节省码率, 同时有效保证了视频感知质量不下降。

4 结 论

提出了一种基于 ROI 提取的全景视频编码方法, 该方法使用当前帧编码残差信息提取 ROI, 利

用等矩形投影不同纬度存在的像素冗余指导非 ROI 的 QP 分配, 结合 ROI 与非 ROI 的 QP 分配策略对全景视频进行编码, 实现了更好地保护 ROI 质量的目的。实验结果表明, 本文方法有效降低了码率, 同时更好地保持了图像的感知质量。

本文算法是在等矩形平面内基于 LCU 级别的, 然而等矩形投影存在较多冗余像素限制了编码效率的进一步提升。后续研究可以使用如立方体投影或八面体投影等冗余像素少的投影面, 进行基于整幅图像的 ROI 提取编码。

参 考 文 献

- [1] Järvinen A. Virtual reality as trend contextualising an emerging consumer technology into trend analysis [C]. IEEE Future Technologies Conference, 2016: 1065-1070.
- [2] Chen J H, Guo W S. Method of panoramic image stitching for theodolite-camera system [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2016, 53(5): 051001. 陈继华, 郭文松. 基于摄影经纬仪的全景图像拼接方法 [J]. 激光与光电子学进展, 2016, 53(5): 051001.

- [3] Jiang X L, Wang S C, Luo S W, *et al.* Real-time panoramic imaging method for train-borne forward motion video[J]. *Acta Optica Sinica*, 2017, 37(5): 0515003.
蒋欣兰, 王胜春, 罗四维, 等. 车载前向运动视频的实时全景成像方法[J]. *光学学报*, 2017, 37(5): 0515003.
- [4] Zhang C P, Wang Q. Survey on imaging model and calibration of light field camera[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2016, 43(6): 0609004.
张春萍, 王庆. 光场相机成像模型及参数标定方法综述[J]. *中国激光*, 2016, 43(6): 0609004.
- [5] Xiao C, Chen F, Zhou M, *et al.* Panoramic display system geometric calibration method based on fisheye camera[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2017, 54(2): 021501.
肖朝, 陈锋, 钟敏, 等. 基于鱼眼相机的全景显示系统几何校正方法[J]. *激光与光电子学进展*, 2017, 54(2): 021501.
- [6] See Z S, Billinghurst M, Cheok A D. Augmented reality using high fidelity spherical panorama with HDRI[C]// *SIGGRAPH Asia 2015 Mobile Graphics and Interactive Applications*, 2015: 14.
- [7] Nakazawa M, Koike H. Synthesizing fixed point of views from a spinning omnidirectional ball camera[C]// *Proceedings of the 8th Augmented Human International Conference*, 2017: 32.
- [8] Ye Y, Alshina Elena, Boyce Jill. Algorithm descriptions of projection format conversion and video quality metrics in 360Lib [C]. *Joint Video Exploration Team of ITU-T SG*, 2017, 16.
- [9] Zare A, Aminlou A, Hannuksela M M, *et al.* HEVC-compliant tile-based streaming of panoramic video for virtual reality applications[C]// *Proceedings of the 2016 ACM on Multimedia Conference*, 2016: 601-605.
- [10] Zare A, Sreedhar K K, Vadakital V K M, *et al.* HEVC-compliant viewport-adaptive streaming of stereoscopic panoramic video [C]. *IEEE Picture Coding Symposium (PCS)*, 2016: 1-5.
- [11] Budagavi M, Furton J, Jin G, *et al.* 360 degrees video coding using region adaptive smoothing [C]. *IEEE International Conference on Image Processing*, 2015: 750-754.
- [12] Li J, Wen Z, Li S, *et al.* Novel tile segmentation scheme for omnidirectional video [C]. *2016 IEEE International Conference on Image Processing*, 2016: 370-374.
- [13] Lee S H, Kim S T, Yip E, *et al.* Omnidirectional video coding using latitude adaptive down-sampling and pixel rearrangement [J]. *Electronics Letters*, 2017, 53(10): 655-657.
- [14] Zakharchenko V, Choi K P, Park J H. Quality metric for spherical panoramic video [C]. *SPIE*, 2016, 9970: 99700C.
- [15] Yu M, Lakshman H, Girod B. A framework to evaluate omnidirectional video coding schemes [C]. *2015 IEEE International Symposium on Mixed and Augmented Reality*, 2015: 31-36.
- [16] Xue X B, Yu M, He M L. Stereoscopic image-quality-assessment method based on visual cell model [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2016, 53(4): 041004.
薛小波, 郁梅, 何美伶. 基于仿视觉细胞模型的立体图像质量评价方法[J]. *激光与光电子学进展*, 2016, 53(4): 041004.
- [17] Jiang G Y, Zhu Y P, Yu M, *et al.* Perceptual video coding: a survey [J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2013, 35(2): 474-483.
蒋刚毅, 朱亚培, 郁梅, 等. 基于感知的视频编码方法综述[J]. *电子与信息学报*, 2013, 35(2): 474-483.
- [18] Abbas A. GoPro test sequences for virtual reality video coding [C]. *Joint Video Exploration Team (JVET) of ITU-T VCEG and ISO/IEC MPEG*, Geneva, 2016.
- [19] Simone F D, Frossard P, Wilkins P, *et al.* Geometry-driven quantization for omnidirectional image coding [C]. *IEEE Picture Coding Symposium (PCS)*, 2016: 1-5.
- [20] Racapé F, Galpin F, Rath G, *et al.* AHG8: adaptive QP for 360 video coding [C]. *Joint Video Exploration Team (JVET) JVET-F0038, m40327*, 2017.