

## 一种快速的纹理预测和混合哥伦布的无损压缩算法

罗 瑜<sup>\*①</sup> 张珍珍<sup>②</sup>

<sup>①</sup>(陕西中医药大学基础医学院 西安 712046)

<sup>②</sup>(新加坡国立大学科学信息系统学院 新加坡 119077)

**摘 要:** 为了进一步降低芯片内无损压缩的运算复杂度和编码时间, 该文在保持高压压缩率的基础上, 提出一种基于方向预测和混合熵编码的快速无损压缩算法。该算法首先采用自适应方法进行纹理方向的预测, 以获得当前像素的参考像素, 并计算预测残差; 然后对预测残差进行混合哥伦布编码, 最终大幅度地提高了无损压缩的压缩性能。实验结果显示, 与基于梯度预测和变长编码的无损压缩算法相比, 该算法在平均压缩率略有提升的前提下, 平均编码时间减少了 36.86%。

**关键词:** 芯片; 快速; 无损压缩; 压缩率; 编码时间

**中图分类号:** TN919.81

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1009-5896(2018)01-0137-06

**DOI:** 10.11999/JEIT170305

## A Fast-lossless Compression Using Texture Prediction and Mixed Golomb Coding

LUO Yu<sup>①</sup> ZHANG Zhenzhen<sup>②</sup>

<sup>①</sup>(Department of Basic Medicine, Shaanxi University of Chinese Medicine, Xi'an 712046, China)

<sup>②</sup>(Institute of Systems, National University of Singapore, 119077, Singapore)

**Abstract:** A fast-lossless compression using texture prediction and mixed golomb coding is proposed to reduce the computational complexity while keeping high compression ratio. First, the reference pixel of the current pixel is gotten by texture direction prediction, meanwhile, the pixel difference is calculated. Then, the pixel difference is entropy coded through mixed Golomb. Thus, the compression performance is improved greatly. Simulation results show that compared with lossless frame memory compression using pixel gain prediction and dynamic order entropy coding, the proposed algorithm reduce the average coding time by 36.86%. Moreover, the average compression ratio is increased slightly in the proposed algorithm.

**Key words:** Chip; Fast; Lossless compression; Compression ratio; Coding time

### 1 引言

随着人们对视频图像质量的要求越来越高, 视频图像的分辨率作为视频质量的重要特性之一, 已经从 720p 和 1080p 过渡到目前市场主流的 4k 分辨率, 其对应的视频压缩标准也从 H.264<sup>[1]</sup>过渡到 H.265<sup>[2]</sup>。对于视频处理芯片, 分辨率的成倍数增加不但会造成芯片面积成本的大幅度增加, 而且也会对总线带宽和功耗带来很大的冲击。

为了克服这一问题, 应用于芯片内的轻量级压

缩技术<sup>[3-5]</sup>被提出。与端口类压缩(如 H.265)技术不同, 芯片内压缩技术的目标<sup>[6,7]</sup>是用较小的逻辑面积成本, 换取尽可能高的压缩倍数, 以减少对 DDR 的占用。芯片内压缩技术分为有损压缩和无损压缩两种<sup>[8,9]</sup>, 其中有损压缩技术主要应用于商业级视频处理芯片(如监控、电视等领域), 而无损压缩技术更多的应用于军工和航天等对图像质量有严格要求的视频处理芯片。

针对无损压缩, 越来越多的技术<sup>[10-12]</sup>被提出, 其中基于 MMSQ 定长编码<sup>[13,14]</sup>和基于方向预测和变长编码<sup>[15]</sup>的无损压缩技术成为主流研究方向。Lian 等人<sup>[16]</sup>在 2016 年发表的论文“Lossless frame memory Compression using Pixel Gain Prediction and Dynamic Order Entropy Coding”(后续简称 LC\_PGP\_DOEC)压缩性能最为优秀。LC\_PGP\_DOEC 采用基于梯度预测和变长编码的无损压缩算

收稿日期: 2017-04-07; 改回日期: 2017-07-07; 网络出版: 2017-08-14

\*通信作者: 罗瑜 luoyu2010@163.com

基金项目: 国家 863 计划项目(2015M16903), 陕西省自然科学基金(2014K14-02-02)

Foundation Items: The National 863 Program of China (2015M16903), The Natural Science Foundation of Shaanxi Province (2014k14-02-02)

法, 该算法首先根据梯度寻找最优的参考像素并计算预测残差(Prediction Difference, PD), 然后根据参考像素所选取的  $k$  值对 PD 进行哥伦布编码。

为了尽可能地提高压缩率, LC\_PGP\_DOEC 的运算方法复杂度较高, 从而导致编码时间过长。针对这一问题, 本文在保证压缩率的前提下, 提出了一种快速的纹理预测和混合哥伦布的无损压缩算法 (Fast-lossless Compression using Texture Prediction and Mixed Golomb Coding, F\_TPMC)。仿真实验结果表明, 与 LC\_PGP\_DOEC 相比, 本文算法较不但平均压缩率略有提升, 而且降低了运算复杂度, 大幅度减少了编码时间。

## 2 LC\_PGP\_DOEC 算法分析

LC\_PGP\_DOEC 首先采用梯度预测方法得到 PD, 然后通过改进的哥伦布变长编码, 对 PD 进行熵编码, 具体如下。

### 2.1 梯度预测方法

梯度预测方法采用 2 个上参考行, 首先利用当前像素周围的已编码像素, 计算梯度值并确定纹理方向; 然后通过纹理方向为当前像素选取参考像素。如图 1 所示, 该方法具体步骤如下:

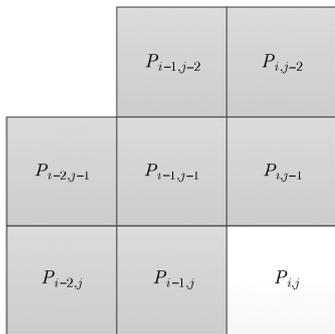


图 1 梯度预测的参考像素选取示意图

步骤 1 假设当前像素为  $P_{i,j}$ , 其中  $i$  和  $j$  分别为当前像素的行坐标和列坐标。首先通过式(1), 分别计算得到水平梯度值  $D_{H1}$ ,  $D_{H2}$  和垂直梯度  $D_{V1}$ ,  $D_{V2}$ ; 然后通过式(2), 计算得到 2 组最终的梯度值。

$$\left. \begin{aligned} D_{H1} &= (P_{i-2,j} + P_{i-1,j}) - (P_{i-2,j-1} + P_{i-1,j-1}) \\ D_{H2} &= (P_{i-1,j-1} + P_{i,j-1}) - (P_{i-1,j-2} + P_{i,j-2}) \\ D_{V1} &= (P_{i-1,j-1} + P_{i-1,j}) - (P_{i-2,j-1} + P_{i-2,j}) \\ D_{V2} &= (P_{i,j-2} + P_{i,j-1}) - (P_{i-1,j-2} + P_{i-1,j-1}) \end{aligned} \right\} (1)$$

$$\left. \begin{aligned} D_1 &= |D_{H1}| + |D_{V1}| \\ D_2 &= |D_{H2}| + |D_{V2}| \end{aligned} \right\} (2)$$

步骤 2 由于梯度值越大, 对纹理的方向的判断越准确, 所以  $D_1$  和  $D_2$  中最大值, 可以作为纹理方向判断的基础。

步骤 3 根据式(3), 利用  $D_1$  和  $D_2$  中最大值的水平和垂直梯度, 计算当前像素的参考角度  $\eta$ , 其中  $x$  为 1 或 2。计算得到的  $\eta$  在  $45.0^\circ, 67.5^\circ, 90.0^\circ, 112.5^\circ, 135.0^\circ, 157.5^\circ$  和  $180.0^\circ$  这 7 个角度中, 选取最相似的角度作为最终的参考方向。选取方式如式(4), 其中  $\theta$  为角度。

$$\eta = D_{Vx} / D_{Hx} \quad (3)$$

$$\theta = \begin{cases} 45.0^\circ, & 0.414 \leq \eta < 1.5 \\ 67.5^\circ, & 1.5 < \eta \leq 5.027 \\ 90.0^\circ, & |\eta| > 5.027 \\ 112.5^\circ, & -5.027 \leq \eta < -1.5 \\ 135.0^\circ, & -1.5 \leq \eta < -0.668 \\ 157.5^\circ, & -0.668 \leq \eta < -0.199 \\ 180.0^\circ, & -0.199 \leq \eta < 0.414 \end{cases} \quad (4)$$

步骤 4 根据参考方向, 在当前像素周围的已编码像素中, 选取参考像素, 并计算得到 PD。

### 2.2 哥伦布变长编码

基本的哥伦布变长编码, 将 PD 通过  $k$  值, 拆分为商和余数 2 个分量, 分别进行熵编码。商通过查表得到码长和码字; 余数码长为  $k$ , 码字为余数值。根据以上原理,  $k$  值的选取和商码表的制定, 成为哥伦布变长编码的关键。

为了进一步提高哥伦布变长编码的编码性能, LC\_PGP\_DOEC 对哥伦布变长编码进行了改进, 改进说明如下:

改进 1: 为减少  $k$  传输占用的比特数, 根据纹理相关性, 采用已编码的参考像素使用的  $k$  为当前 PD 的  $k$ 。

改进 2: 由于大部分 PD 较小, 所以  $k$  的范围被限制为  $[0,2]$ , 并且针对 3 个  $k$  制定了 3 维的商码表。

改进 3: 根据表 1 对每个 PD 的高进行编码; 根据  $k$  对每个 PD 的余数进行编码。

### 2.3 算法分析

根据上述算法原理的介绍, 可以发现 LC\_PGP\_DOEC 具有一定的缺陷, 具体如下:

缺陷 1: 在进行梯度预测时, 为了获得最优的预测方向, 运算过于复杂。根据式(1)、式(2)、式(3)和式(4)可以看出, 对于每个像素的处理有 14 次的加减法运算、1 次除法运算和 8 次比较运算。

缺陷 2: 首先, 对于复杂纹理区域产生的较大的 PD, 由于  $k$  最大为 2, 所以商和余数的码长

表 1 LC\_PGP\_DOEC 的哥伦布 3 维商码表

商	$k=0$	$k=1$	$k=2$
0	0	00	000
1	10	01	001
2	110	100	010
3	1110	101	011
4	111100	1100	1000
5	111101	1101	1001
6	1111100	11100	1010
7	1111101	11101	1011
8	11111100	111100	11000
9	11111101	111101	11001
10	111111100	1111100	11010
11	111111101	1111101	11011
12	1111111100	11111100	111000
13	1111111101	11111101	111001
14	11111111100	111111100	111010
15	11111111101	111111101	111011
...	...	...	...

之和会超过原始数据的比特深度，不但起不到压缩的效果，而且会造成膨胀；其次，对于平坦区域产生的较小的 PD，压缩效果不能进一步提高，如 PD 为 0，最优情况下，仍要消耗 1 bit 进行编码。最后，商的大小没有限制，查表复杂度过高。

### 3 F\_TPMC 算法

针对以上算法的缺点，在保持压缩率不变的基础上，为了进一步降低运算复杂度，本文提出 F\_TPMC 算法。首先，F\_TPMC 对于每个像素，自适应地选择相关性最优的参考像素并计算 PD；然后，根据 PD 的分布，选择游程或自适应  $k$  的哥伦布编码进行熵编码；最终，在压缩率略有提升的情况下，使编码时间得到大幅度降低。

#### 3.1 纹理方向预测

由于图像的纹理方向存在渐变性，一定区域内的纹理趋于一致，所以采用多行参考进行纹理判别，消耗的计算量和产生的收益并非线性正比。因此，本文算法在不过分增加计算复杂度的前提下，为当前像素在 6 个方向上，自适应的选取最优的参考像素。下面具体说明详细步骤。

由于像素间距离越远，相关性越差，所以仅选取与当前像素半径最大为 2 的周围已编码像素，作为参考像素的选取范围。首先为当前像素计算参考方向，如图 2 所示，根据式(5)，计算  $0^\circ$ 、 $30^\circ$ 、 $45^\circ$ 、 $90^\circ$ 、 $135^\circ$  和  $150^\circ$  共 6 个方向的相关性值，其中最小值所

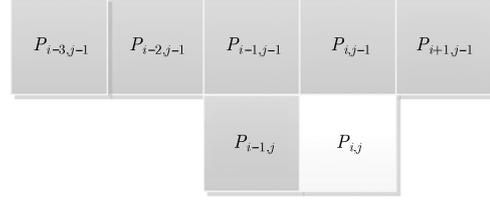


图 2 纹理方向预测的参考像素选取示意图

表示的方向为当前像素的参考方向。然后根据参考方向，在范围内的已编码像素中，选取参考像素并计算得到 PD。

$$\left. \begin{aligned}
 R_0 &= |P_{i-1,j-1} - P_{i,j-1}| \\
 R_{30} &= |P_{i-1,j} - P_{i+1,j-1}| \\
 R_{45} &= |P_{i-1,j} - P_{i,j-1}| \\
 R_{90} &= |P_{i-1,j} - P_{i-1,j-1}| \\
 R_{135} &= |P_{i-1,j} - P_{i-2,j-1}| \\
 R_{150} &= |P_{i-1,j} - P_{i-3,j-1}|
 \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

#### 3.2 混合哥伦布熵编码

针对图像中纹理简单的平坦区域中 PD 值大多为 0 的特点，本文算法采用游程和哥伦布混编的方式，不但提高了平坦区域的压缩率；而且利用自适应  $k$  值和限制级码表，在缓解了 PD 膨胀情况的同时，还节约了查表运算量。编码步骤说明如下：

步骤 1 若连续  $N$  个 PD 都为 0，那么将采用游程编码方式对 PD 进行编码，并将游程标志位置为 1 传送到解码端。 $N$  越小，选择游程模式的机率就越大，图像整体的游程标志位比特数就越多；反之同理。因此本算法对游程的 PD 数  $N$  限定大小为 4, 8 或 16。

步骤 2 若  $N$  个 PD 中有任何 PD 不为 0，那么将采用哥伦布编码方式对 PD 进行编码，并将游程标志位置为 0 传送到解码端。考虑到 PD 间的相关性，每个 PD 的  $k$  根据上一个 PD 的取值进行选取，选取规则如表 2 所示。

表 2  $k$  值与 PD 的映射查询

上一个 PD 值	当前 PD 的 $k$
[0-1]	0
[2-3]	1
[4-7]	2
[8-15]	3
[16-31]	4
[32-63]	5
[64-∞]	6

为了进一步减少传输 PD 的 bit 数并限制膨胀, 本文算法采用如下方法制定码表:

方法 1: 由于  $k$  值越大, 其对应的商的最大值出现的概率越低, 所以将多维码表变为 1 维码表。

方法 2: 由于图像中 PD 大部分较小, 所以码表采用“低商递增概率”和“高商等概率”的混合码表。

方法 3: 为了限制膨胀, 在码表中应规定了商的逃逸值。

本文算法最终产生的码表如表 3 所示。

表 3 限制级的 1 维哥伦布码表

商	商		余数	
	码字	码长	码字	码长
0	1	1	余数	$k$
1	10	2	余数	$k$
2	100	3	余数	$k$
3	1000	4	余数	$k$
4	10000	5	余数	$k$
5	1000000	7	余数	$k$
6	1100000	7	余数	$k$
7	0100000	7	余数	$k$
>7	0000000	7	PD	PD 的比特位宽

### 3.3 解码方法

本文算法生成的比特流, 在解码端可以做到图像的无损恢复。解码方法为编码方法的逆过程, 具体步骤为:

步骤 1 通过读取游程标志位, 确定比特流的解码方式, 若为游程方式, 则所有的 PD 置为 0; 若为哥伦布方式, 则通过自适应  $k$ 、表 2 和表 3 恢复 PD。

步骤 2 与编码端的纹理方向预测同理, 根据周围已解码的像素, 自适应地恢复当前像素。

### 3.4 算法分析

首先, 根据式(5)可知, 本文算法在进行纹理预测时对一个像素仅有 6 次的加减法运算和 6 次比较运算, 而 LC\_PGP\_DOEC 算法却有 14 次的加减法运算、1 次除法运算和 8 次比较运算, 因此本文算法在运算复杂度方面比 LC\_PGP\_DOEC 算法有大幅度下降。

其次, 本文算法采用混合哥伦布编码的方式, 不但游程模式使  $N$  个 PD 的哥伦布编码运算量几乎全部消失; 而且采用的逃逸商方法大大减少了商查表的运算量。

最终, 本文算法在原理上, 比 LC\_PGP\_DOEC 大幅度减少了运算量。

## 4 实验结果与分析

为了对比算法性能, 我们选取统一的 PC 测试平台和不同复杂度的测试序列。测平台配置 CPU 为 InterCore I7、内存为 8 G、操作系统为 64 位 WIN10。测试序列分为纹理复杂度简单、中等和复杂 3 种共 9 个序列。

为了选取本文算法中最优的游程 PD 数量  $N$ , 本文分别测试  $N$  在 3 种情况下 ( $N = 4, 8$  和 16) 的平均压缩率 (Average Compression Ratio, AVE\_CR), AVE\_CR 的计算如式(6):

$$\text{AVE\_CR} = (1 - S_{\text{bs}} / S_{\text{yuv}}) \times 100\% \quad (6)$$

其中,  $S_{\text{bs}}$  为压缩后码流大小,  $S_{\text{yuv}}$  为压缩前原始 YUV 文件大小。

实验结果如表 4 所示, 可以发现: 由于纹理简单图像中连续 PD 为 0 的概率最大, 综合游程模式节省的比特和游程标志位消耗的比特, 因此  $N = 16$  最优。同理对于纹理中等图像,  $N = 8$  最好; 对于纹理复杂图像,  $N = 4$  最好。综合所有纹理复杂度来看,  $N = 8$  最优, 因此本文算法选用  $N = 8$  为游程 PD 数量。

本文算法对不同纹理复杂度的图像进行处理时, 其自适应预测操作步骤均相同, 其区别在于图像纹理越简单, 其产生的 PD 越小, PD 为 0 的几率越大。因此可推出, 在熵编码中图像纹理越简单, PD 连续为 0 的情况越多, 采用游程模式的概率越

表 4 本文算法中不同  $N$  的压缩率对比

图像复杂度	序列	AVE_CR (%)		
		$N=4$	$N=8$	$N=16$
简单	ducks_take_off	76.23	78.12	79.35
	blue_sky	75.12	79.02	80.02
	Johnny	76.06	78.34	79.32
	简单平均	75.80	78.49	79.56
中等	crowd_run	65.23	67.23	64.15
	old_town_cross	65.12	68.98	66.91
	stockholm	63.16	66.65	61.98
	中等平均	64.50	67.62	64.34
复杂	rush_field_cuts	55.98	56.01	53.27
	riverbed	56.42	55.78	50.75
	mobcal	57.76	56.29	49.45
	复杂平均	56.72	56.02	49.45
全部平均		65.68	67.38	65.02

大, 节省比特数越多, 压缩率也就越高; 当 PD 不为 0 时, 较小的 PD 会导致较小的  $k$ , 并最终导致哥伦布编码的比特数较少; 较大的 PD 会触发逃逸商的限制, 导致编码比特数不会过大。

虽然 LC\_PGP\_DOEC 采用更复杂预测方法, 产生了更小的 PD, 但是本文算法采用的游程模式和逃逸商模式, 对于低复杂度图像可以提升更高的压缩率; 对于高复杂度图像可以更好地限制膨胀。根据表 5 的实验结果, 本文算法的低复杂度图像和高复杂度图像的 AVE\_CR 分别为 78.49% 和 56.02%, 均优于 LC\_PGP\_DOEC。综合来看 LC\_PGP\_DOEC 的 AVE\_CR 为 66.89%, 本文算法的 AVE\_CR 为 67.38%, 比 LC\_PGP\_DOEC 提高了 0.49%。

为了比较本文算法与 LC\_PGP\_DOEC 的压缩性能, 我们在 AVE\_CR 的基础上, 对平均相对编码时间 (Average Relative Encoding Time, AVE\_RET) 也进行测试。AVE\_RET 计算式如式 (7):

$$\text{AVE\_RET} = \left( T_{F\_TPMC} / T_{LC\_PGP\_DOEC} \right) \times 100\% \quad (7)$$

其中,  $T_{F\_TPMC}$  和  $T_{LC\_PGP\_DOEC}$  分别为 F\_TPMC 和 LC\_PGP\_DOEC 的编码时间。AVE\_RET 越小, 说明本文算法的编码时间相对越少; 反之亦然。

对于 AVE\_RET, 首先, 对于单个像素, 本文算法的纹理方向预测较 LC\_PGP\_DOEC 的梯度预测, 运算量大幅度降低; 其次, 本文算法的游程模式可以省去  $N$  个 PD 的编码时间; 最后, 本文算法的哥伦布编码中, 采用的逃逸商方法大大节省了商查表的比较次数。实验数据表明, 由于纹理简单图像产生连续 PD 为 0 的可能性较大, 所以随着图像纹理由复杂到简单, 采用游程模式的概率渐渐增大, 编码时间越来越少, 即 AVE\_RET 也逐渐变小。最终本文算法的 AVE\_RET 为 63.14%, 较 LC\_PGP\_DOEC 节省了 36.86% 的编码时间。

## 5 结束语

针对 LC\_PGP\_DOEC 算法的缺点, 本文在保持高压缩率的前提下, 为了进一步降低芯片内无损压缩的计算复杂度, 提出了 F\_DPME 算法。F\_DPME 算法首先根据纹理方向, 为每个像素自适应的选取纹理方向的邻近参考像素, 并计算获得 PD; 然后采用逃逸商的码表和游程的方法, 对 PD 进行混合哥伦布编码, 最终在平均压缩率略有提高的前提下, 大幅度的降低了算法复杂度, 节约了编码时间。实现结果表明, 与 LC\_PGP\_DOEC 算法相比, 本文算法在平均压缩率提高了 0.49% 的前提下, 平均编码时间减少了 36.86%。

表 5 本文 F\_TPMC 算法与 LC\_PGP\_DOEC 算法压缩的性能对比

复杂度	序列	AVE_CR(%)		AVE_RET(%)
		LC_PGP_DOEC	F_TPMC	
简单	ducks_take_off	76.98	78.12	50.96
	blue_sky	78.65	79.02	47.78
	Johnny	78.01	78.34	45.45
	简单平均	77.88	78.49	48.06
中等	crowd_run	68.23	67.23	60.91
	old_town_cross	69.51	68.98	61.23
	stockholm	67.01	66.65	63.56
	中等平均	68.25	67.62	61.90
复杂	rush_field_cuts	54.45	56.01	78.51
	riverbed	54.23	55.78	79.65
	mobcal	54.98	56.29	80.21
	复杂平均	54.55	56.02	79.46
全部平均	66.89	67.38	63.14	

## 参 考 文 献

- [1] ITU-T Study Group 16.23008-2-2013. ITU-T recommendation h.265[S]. Geneva, 2013.
- [2] SCHWARZ H, MARPE D, and WIEGAND T. Overview of the scalable video coding extension of the h.26/avc standard[J]. *IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology*, 2007, 17(9): 1103-1120. doi: 10.1109/

- TCSVT.2007.905532.
- [3] HNEESH Allaeldien and DEMIREL Hasan. DWT-DCT-SVD based hybrid lossy image compression technique[C]. 2016 International Image Processing, Applications and Systems (IPAS), Hammamet, Tunisia, 2016, 11(5): 1150-1172. doi: 10.1109/TGRS.2016.2603527.
- [4] LEVENIT Hrvoje, NENADI Kresimir, GALI Irena, *et al.* Compression parameters tuning for automatic image optimization in web applications[C]. ELMAR, 2016 International Symposium. Zadar, Croatia, 2016: 161-180. doi: 10.1109/ELMAR.2016.7731782.
- [5] BRAHIMI T, BOUBCHIR L, FOURNIER R, *et al.* An improved multimodal signal-image compression scheme with application to natural images and biomedical data[J]. *Multimedia Tools & Applications*, 2016, 9(7): 1-23. doi: 10.1007/s11042-016-3952-7.
- [6] XIAO Jun, TONG Miao, ZHANG Zhu, *et al.* A joint color image encryption and compression scheme based on hyper-chaotic system[J]. *Nonlinear Dynamics*, 2016, 84(4): 2333-2356. doi: 10.1007/s11071-061-2648-x.
- [7] ZHOU N, PAN S, CHENG S, *et al.* Image compression encryption scheme based on hyper-chaotic system and 2D compressive sensing[J]. *Optics & Laser Technology*, 2016, 82(2): 121-133. doi: 10.1016/j.optlastec.20.
- [8] BUI Vy, CHING Lincheng, LI Dunling, *et al.* Comparison of lossless video and image compression codecs for medical computed tomography datasets[C]. 2016 IEEE International Conference on Big Data. Washington D.C., USA, 2016: 1123-1145. doi: 10.1109/BigData.2016.7841075.
- [9] SHEN Hongda, PAN W David, and WU Dongsheng. Predictive lossless compression of regions of interest in hyper spectral images with no-data Regions[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2017, 55(1): 173-182. doi: 10.1109/TGRS.2016.2603527.
- [10] FAN Y, SHANG Q, and ZENG X. In-block prediction-based mixed lossy and lossless reference frame recompression for next generation video encoding[J]. *IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology*, 2015, 25(1): 112-124. doi: 10.1109/TCSVT.2014.2329353.
- [11] SILVERIRA D, POVALA G, AMARAL L, *et al.* A low complexity and lossless reference frame encoder algorithm for video coding [C]. IEEE International Conference on Acoustic Speech and Signal Processing, Danvers, 2014: 7408-7412. doi: 10.1109/ICASSP.2014.6855029.
- [12] GUPTE A D, AMRUTUR B, MEHENDELE M M, *et al.* Memory bandwidth and power reduction using lossy reference frame compression in video encoding[J]. *IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology*, 2015, 21(20): 225-230. doi: 10.1109/TCSVT.2011.2105599.
- [13] MA Y and KANG L. Adaptive granularity selection in reference picture memory compression[C]. International Conference on Mechatronics, Electronic, Industrial and Control Engineering, Shenyang, China, 2015: 1158-1161. doi: 10.2991/meic-15.2015.263.
- [14] LEE Y. A new frame recompression algorithm integrated with h.264 video compression[C]. International Symposium on Circuits and Systems, Nagoya, 2007: 1621-1624. doi: 10.1109/ISCAS.2007.378829.
- [15] SAMPAIO F, ZATT B, SHAFIQUE M, *et al.* Content-adaptive reference frame compression based on intra-frame prediction for multi view video coding[C]. IEEE International Conference on Image Processing, Melbourne, 2013: 1831-1835. doi: 10.1109/ICIP.2013.6738377.
- [16] LIAN X, LIU Z, ZHOU W, *et al.* Lossless frame memory compression using pixel-grain prediction and dynamic order entropy coding for video technology[J]. *IEEE Transactions on Circuits & Systems for Video Technology*, 2016, 26(1): 223-235. doi: 10.1109/TCSVT.2015.2469572.
- 罗 瑜: 女, 1984 年生, 讲师, 研究方向为图像/视频传输与处理.
- 张珍珍: 女, 1984 年生, 博士生, 研究方向为图像处理.