

# 基于模糊逻辑的无损彩色图像压缩算法

李 清 李东晖

(重庆大学计算机学院 重庆 400030)

**摘 要** 在数字图像处理中,无损彩色图像压缩有着越来越广泛的应用。为了充分利用彩色图像色彩分量之间的相关性以及提高彩色图像的无损压缩率,本文提出一种基于模糊逻辑的无损彩色图像压缩算法。该算法将模糊逻辑和 H. 264 帧内预测算法相结合,提出一种改进的帧内预测算法并运用到对彩色分量 G 的预测中;然后利用彩色分量之间的纹理相似性来降低 R、B 分量的纹理复杂度;再结合 G 分量的最优预测模式以及基于上下文统计的自适应补偿算法,对 R、B 分量进行帧内预测;最后,通过预测结果来确定最优参数,对 3 个彩色分量的预测差值进行 Golomb 编码。实验表明,与无损压缩算法 JPEG-LS 相比,该算法对纹理清晰的彩色图像的压缩率有较大的提高。

**关键词** 无损压缩,帧内预测,纹理复杂度,模糊逻辑,Golomb 编码

**中图分类号** TP391. 41

**文献标识码**

## Lossless Color Image Compression Method Based on Fuzzy Logic

LI Qing LI Dong-hui

(College of Computer Science, Chongqing University, Chongqing 400030, China)

**Abstract** In digital image processing, lossless color image compression has increasingly wide range of applications. To take full advantage of the correlation between color components and improve lossless compression rate of color image, this paper proposed a lossless color image compression algorithm based on fuzzy logic. The algorithm combines fuzzy logic and H. 264 intra prediction algorithm together, proposes an improved intra prediction algorithm which is used to predict color component of G. To reduce the texture complexity of R, B component, the author used the similarity of image texture between color components. Then, an algorithm that combining the optimal prediction mode of G component and adaptive compensation algorithm based on the context of statistics was used to predict color component of R and B. At last, the difference between the predictions for the three color components is encoded by Golomb coding in which the optimal parameter is calculated by predicted results. The experimental results show that when encoding these color images which have clear textures, the proposed method has significant improvement in coding efficiency compared with the JPEG-LS.

**Keywords** Lossless compression, Intra prediction, Texture complexity, Fuzzy logic, Golomb coding

## 1 引言

图像压缩技术是现代信息技术处理部分非常重要的内容。随着高清摄像技术的快速发展,百万甚至千万像素高清数码产品越来越普及,人们对于图像质量的要求越来越高。这使得对数字图像的存储和传输变得日益困难。人们对于静止图像压缩技术的研究已经进行了几十年,并且出现了许多优秀的图像压缩算法。图像压缩算法主要分为有损压缩和无损压缩两种。目前,有损压缩技术凭借着其对图像的高压缩率被广泛运用于很多领域,然而,在艺术作品保存、医学图像以及历史文档等许多特殊的领域要求对图像的压缩为无损压缩。因此,对于无损静止图像压缩算法的研究有着非常重要的实用价值。

在无损静止图像压缩技术中,主要分为基于变换方法和基于预测方法两个方向。在基于变换的无损压缩方法中,大

多数方法均由 DCT 转向小波变换。基于小波变换编码方法的最大优势在于可实现嵌入式编码,即可以对感兴趣区域的图像信息进行优先编码。JPEG2000 是基于变换的无损压缩算法中具有代表性的算法。JPEG2000<sup>[1,2]</sup>主要采用离散小波变换以及嵌入式多分辨率算法(EBCOT)。JPEG2000 算法对图像具有优秀的无损压缩效果,但是 JPEG2000 算法的主要缺点在于其复杂度较高,从而降低了其对图像的压缩性能。在基于预测的无损压缩算法中,研究方向主要由 DPCM 固定预测转向自适应的基于上下文模型的预测。其中 JPEG-LS 是最具有代表性的压缩算法。JPEG-LS<sup>[3,4]</sup>是一种低复杂度无损压缩算法。JPEG-LS 主要使用非线性预测、基于上下文统计的建模、Golomb 编码等技术。从目前来看, JPEG-LS 可以说是低复杂度无损压缩算法的一个标准。但是,当把 JPEG-LS 运用到彩色图像压缩时,如果直接对每个色彩分量使用 JPEG-LS 算法,则会忽视色彩分量间的冗余信息。在对

彩色图像压缩算法的研究中,很多算法已经注意到了彩色分量间的差异。文献[5]首先将彩色图像的 RGB 色彩分量转换到  $YCbCr$  色彩空间中,然后对 Y 分量的色彩信息使用传统无损压缩方法(如 JPEG-LS、JPEG2000)进行压缩,对色彩信息相对平滑的  $Cb$  分量和  $Cr$  分量使用基于层次分解的算法进行压缩。文献[6]将基于上下文的预测模型和算术编码相结合,改进了文献[5]转换后色彩分量的分层压缩方案。这两种方法对彩色图像都具有较好的压缩效果。然而,虽然这两篇文献都对彩色图像的色彩分量进行了区别压缩,但是它们对降低算法复杂度没有做过多的考虑,因此这两篇文献的算法复杂度仍然很高。

本文提出基于模糊逻辑的无损彩色图像压缩算法;考虑到彩色图像的 3 个色彩分量之间存在冗余信息,本文算法在编码时,对 3 个色彩分量采用不同的编码策略。该算法使用改进的基于模糊逻辑的帧内预测算法对彩色分量 G 进行预测,并获取 G 分量的最佳预测模式。在对 R、B 分量编码前,该算法首先利用 3 个色彩分量之间的纹理相似性,对 R、B 分量进行初步的预处理,降低这两个色彩分量的冗余信息,然后结合彩色分量 G 的最佳预测模式以及基于上下文统计的自适应补偿算法对其他两个色彩分量进行预测。最后再对每个色彩分量的预测差值进行 Golomb 编码。

## 2 帧内预测编码

### 2.1 H. 264 帧内预测

H. 264 帧内预测利用数字图像中每一个像素在空域上的方向性,消除了像素间的冗余,从而提高图像编码效率。H. 264 针对不同的像素块采用了不同的编码方法,在这里只介绍  $4 \times 4$  像素块预测模式。

H. 264 对  $4 \times 4$  像素块的预测有 9 种不同的模式,对每一个  $4 \times 4$  像素块的预测需要用到该像素块左边以及上边共 13 个像素。9 种预测模式中,有 8 种模式与图像的纹理方向相关,每一种模式的预测方向如图 1 所示。其中第 3 种 DC(均值)模式是采用 A、B、C、...、K、L 8 个像素和的均值来进行预测的,其他 8 种模式根据预测方向的不同有很大的差异。8 种预测模式的预测方向基本上涵盖了图像所有可能出现的纹理方向,因此结合 DC(均值)模式,即使将该方法用于预测细节丰富的图像也会有很好的预测效果。

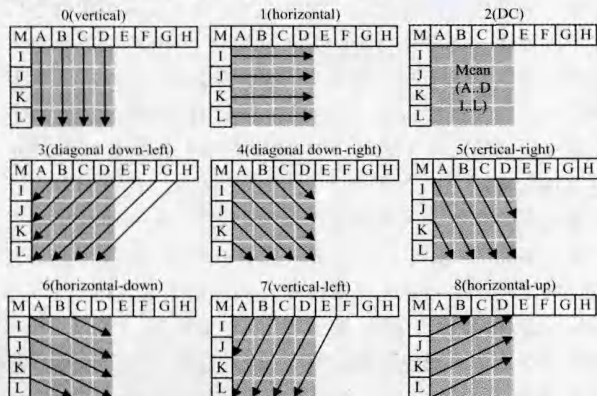


图 1  $4 \times 4$  像素块预测模式

在 H. 264 的帧内预测算法中,通常使用式(1)来计算每种预测模式的预测代价。其中,QP 表示量化参数,SSD( $\cdot$ )

为预测像素的失真度度量, $\lambda_{mod e}$  为拉格朗日系数, $R(\cdot)$  表示在当前预测模式下编码的码率。在对一个  $4 \times 4$  像素块使用全遍历算法计算完所有预测模式的预测代价之后,预测代价最小的预测模式便是该像素块的最优预测模式。

$$J(s, c, \text{mode}/QP, \lambda_{mod e}) = SSD(s, c, \text{mode}/QP) + \lambda_{mod e} \cdot R(s, c, \text{mode}/QP) \quad (1)$$

### 2.2 基于边缘方向直方图的帧内预测编码

在 H. 264 帧内预测算法中,8 种不同方向的预测模式代表着图像不同的纹理方向。在编码中,图像的最优预测模式表示图像的纹理方向与该模式的预测方向一致或接近。为了提高 H. 264 帧内预测编码的性能,Pan Feng 等人<sup>[7]</sup>提出了基于图像边缘方向直方图的快速帧内预测算法。

本文算法使用在边缘检测上具有很好效果的 Sobel 算子来获取图像的边缘方向矢量。定义像素  $P_{(i,j)}$  的边缘方向矢量  $D_{(i,j)} = (x_{(i,j)}, y_{(i,j)})$  为:

$$x_{(i,j)} = p_{(i-1,j+1)} + 2 \times p_{(i,j+1)} + p_{(i+1,j+1)} - p_{(i-1,j-1)} - 2 \times p_{(i,j-1)} - p_{(i+1,j-1)} \quad (2)$$

$$y_{(i,j)} = p_{(i+1,j=1)} + 2 \times p_{(i+1,j)} + p_{(i+1,j+1)} - p_{(i-1,j-1)} - 2 \times p_{(i-1,j)} - p_{(i-1,j+1)} \quad (3)$$

其中, $x_{(i,j)}$ 、 $y_{(i,j)}$  分别为水平方向和垂直方向的矢量强度。

$$Ang(P_{(i,j)}) = (\arctan(\frac{y_{(i,j)}}{x_{(i,j)}}) \times 180) / \pi \quad (4)$$

然后再通过式(4)来计算图像中每一个像素点的矢量方向,通过这个角度值便可确定每一个像素点的最优预测模式,这样便可以统计出  $4 \times 4$  像素块的边缘方向直方图,频率最高的预测模式便有可能是最优预测模式。Pan 算法认为最优预测模式最有可能出现在频率最高的预测模式及其周边的两种模式中,另外在计算时还要附加上 DC 均值模式;因此,对于每一个  $4 \times 4$  像素块,Pan 算法只需计算 4 次代价函数便可以获取到最优预测模式,极大减少了预测计算量。

## 3 基于模糊逻辑的彩色无损压缩

### 3.1 基于模糊逻辑的代价函数

传统数学是以追求精确性为目的,一个元素与一个集合的关系只存在属于与不属于两种。与传统数学不同的是,模糊数学主要用于研究边缘模糊的集合问题。虽然模糊与精确是两个对立的概念,但是在解决问题时各自都有各自的优势。对于一个问题的解决,有时候模糊性比精确性还要好<sup>[8]</sup>。由于在模糊集合中,个体与集合不存在绝对的从属关系,因此我们通常通过隶属函数的运算来描述个体与集合的关系。在本文算法中,我们使用隶属函数  $\mu(x)$  来代替 H. 264 帧内预测算法中的代价函数,通过计算不同预测模式下的预测像素块与原像素块的模糊程度,便可以选出预测性能最好的预测模式。

数字图像中像素取值在  $[0, 255]$  之间,所以预测像素与原像素的差值在  $[-255, 255]$  之间,但是通常情况下,绝大多数预测像素与原像素的差值都不会超过  $[-50, 50]$ 。为了扩大预测差值对隶属函数的影响,我们使用预测像素与原像素的平方差来计算预测像素与原像素的相似度:

$$\mu(x) = 1 - \frac{(c^2 - x^2)}{65025} \quad (5)$$

其中, $c$  为原像素值, $x$  为预测像素值。

对于模糊集合而言,隶属函数用于描述个体元素的相似性。在帧内预测算法中,我们以  $4 \times 4$  像素块作为最小的模糊集合,为了能够合理地描述每一种预测模式下,预测像素块对原像素块的模糊程度,我们引入模糊熵的概念。对模糊熵  $e(A)$  的定义用于描述集合  $A$  的模糊性的函数。式(6)为本文算法使用的模糊熵的定义式。

$$e(A) = \sum_{i=1}^n (1 - \mu(x)) / n \quad (6)$$

其中,模糊熵  $e(A)$  具有以下性质:

- (1)  $e(A) = \min$ , 当且仅当  $\mu(x) = 1$ ;
- (2)  $e(A) = \max$ , 当且仅当  $\mu(x) = 0$ ;
- (3)  $e(A) < e(B)$ , 集合  $A$  比集合  $B$  具有更好的模糊性。

### 3.2 基于模糊逻辑的帧内预测编码

在本文算法中,考虑到色彩分量之间信息的相关性,我们对彩色图像的 3 个色彩分量采取不同的预测方法。

对  $G$  分量,结合模糊逻辑,我们使用改进的 Pan 算法,算法步骤如下:

- (1) 设置模糊熵阈值  $T$ ;
- (2) 计算 DC 模式的模糊熵  $T_1$ , 如果  $T_1 < T$ , 则停止计算,DC 模式为最优预测模式,转第(5)步,否则转第(3)步;
- (3) 计算边缘方向直方图,获取频率最大的预测模式及其左右的两个预测模式;
- (4) 计算第(3)步获取的 3 种预测模式的模糊熵,模糊熵最小的则为最优预测模式;
- (5) 计算最优预测模式下的预测差值。

图像的编码结果主要取决于被编码图像的纹理复杂度<sup>[9,10]</sup>。对于 RGB 色彩模型的 3 个色彩分量,不同图像的同一彩色分量特征差异较大,没有固定的特性,所以本文选择保持  $G$  分量的纹理复杂度不变,对  $R$ 、 $B$  分量进行处理,减少彩色分量之间的冗余信息,降低  $R$ 、 $B$  分量的纹理复杂度,提高编码效果。由于 3 个色彩分量之间拥有相似的纹理,而无损压缩又限制我们不能出现任何的信息丢失。因此,我们使用式(7)、式(8)来进行  $R$ 、 $B$  分量的初步处理。

$$\bar{R}_{(i,j)} = R_{(i,j)} - G_{(i,j)} \quad (7)$$

$$\bar{B}_{(i,j)} = B_{(i,j)} - G_{(i,j)} \quad (8)$$

通过表 1 发现,由于色彩分量之间具有相似的纹理,利用式(7)、式(8)可以有效地减少  $R$ 、 $B$  分量的纹理复杂度,而且这种变换也是可逆的。在此基础上对  $\bar{R}$ 、 $\bar{B}$  进行后续编码会有更好的编码效果。

表 1 式(7)、式(8)处理  $R$ 、 $B$  分量的纹理复杂度结果对比

| 测试图像    | $W_R$  | $W_{R-G}$ | $W_B$  | $W_{B-G}$ |
|---------|--------|-----------|--------|-----------|
| flower  | 3807.4 | 313.7     | 5991   | 1000.3    |
| lena    | 2411   | 642.3     | 1152.6 | 645.9     |
| girl    | 3501.3 | 1247      | 3209.4 | 352.2     |
| barbara | 3136.3 | 874.9     | 3004.2 | 429.6     |
| pens    | 3655.5 | 591       | 3773.6 | 1180.3    |

由于 3 个色彩分量的纹理相似性,本文算法不再重复计算  $\bar{R}$ 、 $\bar{B}$  分量的最优预测模式,而是利用  $G$  分量的最优预测模式直接对  $\bar{R}$ 、 $\bar{B}$  进行预测。表 2 记录的是利用上述方法直接进行预测后, $G$  分量、 $\bar{R}$  分量、 $\bar{B}$  分量预测差值绝对值期望的对比。通过表 2 发现,使用这种方法直接对  $\bar{R}$  分量、 $\bar{B}$  分量进行预测后预测结果与  $G$  分量的预测结果相似甚至更好,而且这种预测方法也极大地减少了预测计算量。

表 2  $G$  分量、 $\bar{R}$  分量、 $\bar{B}$  分量预测差值绝对值期望

| 测试图像    | $A_G$ | $A_R$ | $A_B$ |
|---------|-------|-------|-------|
| flower  | 3.78  | 3.14  | 3.62  |
| lena    | 5.49  | 5.17  | 4.54  |
| girl    | 3.76  | 4.03  | 3.21  |
| barbara | 7.66  | 4.18  | 4.42  |
| pens    | 4.81  | 3.13  | 4.28  |

另外,为了减少预测误差,本文算法采用基于上下文统计的自适应补偿算法。在对  $\bar{R}$  分量、 $\bar{B}$  分量进行预测时,维护了两个变量  $E$ 、 $C$ ,其中  $E$  表示预测差值期望, $C$  表示预测误差补偿值。

对  $\bar{R}$  分量、 $\bar{B}$  分量的预测过程为:

- (1) 设置阈值  $H$  ( $H > 0$ );
- (2) 利用  $G$  分量的最优预测模式预测当前像素,获取预测差值  $d$ ;
- (3) 加入预测误差补偿值,  $\bar{d} = d + C$ ;
- (4) 更新预测差值期望  $E$ , 如果  $E > H$ , 转步骤(5), 如果  $E < -H$ , 转步骤(6);
- (5)  $C = C + h$ ;
- (6)  $C = C - h$ 。

## 4 彩色图像编码结构

彩色图像编码结构如图 2 所示。图像的  $G$  分量使用基于模糊逻辑的帧内预测算法进行预测,并获取  $G$  分量的最优预测模式;然后  $G$  分量的预测差值进行 Golomb 编码。对图像的  $R$ 、 $B$  分量先计算其与  $G$  分量的差值,然后对利用  $G$  分量的最优预测模式对差值进行帧内预测和自适应补偿,最后对  $\bar{R}$ 、 $\bar{B}$  的预测差值进行 Golomb 编码。

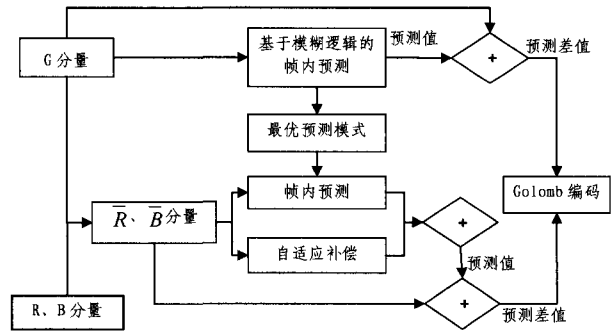


图 2 本文提出的彩色图像编码结构

## 5 实验结果与分析

本文实验图像分两组,分别为图像纹理模糊和图像纹理清晰两组,测试的结果与 JPEG-LS 进行比较。

对于图像纹理模糊的实验,本文选用了 flower( $512 \times 480 \times 8$ )、lena( $512 \times 512 \times 8$ )、boatscolor( $787 \times 576 \times 8$ )、ceblecar( $512 \times 480 \times 8$ )、cornfield( $512 \times 480 \times 8$ )等 5 张彩色图像,测试结果如表 3 所列。

表 3 彩色纹理模糊图像压缩结果(bpp)

| 测试图像       | JPEG-LS | 本文算法   | 比 JPEG-LS 提高(%) |
|------------|---------|--------|-----------------|
| flower     | 11.707  | 11.739 | -0.27           |
| lena       | 13.482  | 12.856 | 4.87            |
| boatscolor | 11.594  | 11.374 | 1.93            |
| ceblecar   | 12.182  | 12.307 | -1.01           |
| cornfield  | 13.714  | 13.117 | 4.54            |
| average    | 12.535  | 12.278 | 2.01            |



对于图像纹理清晰的实验,本文选用了 girl( $720 \times 576 \times 3$ )、barbara( $720 \times 576 \times 8$ )、pens( $512 \times 480 \times 8$ )、baboon( $500 \times 480 \times 8$ )、goldhill( $720 \times 576 \times 8$ )等 5 张彩色图像,测试结果如表 4 所列。

表 4 彩色纹理清晰图像压缩结果(bpp)

| 测试图像     | JPEG-LS | 本文算法   | 比 JPEG-LS 提高(%) |
|----------|---------|--------|-----------------|
| girl     | 12.499  | 11.734 | 6.52            |
| barbara  | 12.251  | 11.556 | 5.99            |
| pens     | 12.765  | 12.224 | 4.42            |
| baboon   | 19.047  | 16.581 | 14.84           |
| goldhill | 14.035  | 12.469 | 12.55           |
| average  | 14.119  | 12.912 | 8.86            |

由表 4 可以看出,本文算法对纹理清晰的图像具有很好的编码效果。因为在本文算法中,无论是基于模糊逻辑的帧内预测算法还是在彩色分量预处理上,都充分利用了图像的纹理特征,去除了大量的色彩分量间的冗余信息。同时也是为什么表 3 中实验图片编码效果一般的原因。由于表 3 的实验图片纹理相对模糊,使得本文算法在对其进行编码时,没能发挥算法的优势,但最终的编码效果仍然与 JPEG-LS 算法编码效果相近。

对于本文算法的算法复杂度可以结合实验图像的编码时间做简单分析,实验测试平台为 Intel Core2 2.13GHz,试验结果如表 5 所列。与 JPEG-LS 相比,本文算法复杂度有稍微的提升,主要由于本文算法对图像色彩分量添加了预处理操作,以及在计算最优预测模式时,需要计算边缘方向直方图;对比 JPEG-LS 基于上下文预测的像素预测算法,本文算法复杂度确实有较大的提升。但是在计算最优预测模式时,本文算法只计算了一个色彩分量的最优预测模式,避免了算法复杂度的过分提升。因此,从整体上看,本文算法仍然具有较好的压缩性能。

表 5 算法运行时间对比结果

| JPEG-LS | 本文算法  |
|---------|-------|
| 3.53s   | 4.16s |

**结束语** 本文算法充分结合帧内预测算法在像素预测上的优势并且弥补了该算法在预测性能上的不足。同时,本文算法也将一部分研究重点放在去除色彩分量冗余信息上,这部分研究成果也在图像编码结果上体现出来。基于模糊逻辑的彩色图像无损压缩算法相比 JPEG-LS 对纹理清晰的彩色图像的压缩比有较高的提升,而且本文算法在设计时,对算法的复杂度也有一定的控制,使该算法仍然具有较好的压缩性能。然而,本文算法并不像 JPEG-LS 算法对像素预测差值的编码模式有着更多的考虑,所以本文算法后续的提高可以在编码模式上做进一步研究,以提高图像的压缩率。

### 参考文献

[1] Adama M D, Kossentini F. Reversible integer-to-integer wavelet transforms for image compression: Performance evaluation and analysis[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2000,

9(6):1010-1024  
[2] Shi Bo-xin, Liu Lin. Comparison between JPEG2000 and H. 264 for digital cinema[C]//IEEE International Conference on Digital Object Identifier. 2008;725-728  
[3] ISO/IEC JTC 1/SC 29/WG 1 FCD 14495. Lossless and near-loss-less coding of continuous tone still images[EB/OL]. [2012-03-01]. www.hpl.hp.com/research/papers/seroussiIEEE.pdf  
[4] Wang Z, Klaiber M, Gera Y, et al. Fast lossless image compression with 2D Golomb parameter adaptation based on JPEG-LS[C]//Signal Processing Conference (EUSIPCO). 2012 Proceedings of the 20th European. 1920-1924  
[5] Kim S, Cho N I. A lossless color image compression method based on a new reversible color transform[C]//Visual Communications and Image Processing (VCIP). IEEE, 2012;1-4  
[6] Kim S, Cho N I. Hierarchical Prediction and Context Adaptive Coding for Lossless Color Image Compression[J]. Image Processing, IEEE, 2014, 23(1):445-449  
[7] Pan Feng, Lin Xiao. FastMode Decision Algorithm for Intra-prediction in H. 264/AVC Video Coding[J]. IEEE Transaction on Circuits and System for Video Technology, 2005, 15(7):813 - 822  
[8] 王保平. 基于模糊技术的图像处理研究方法[D]. 西安:西安电子科技大学, 2004  
[9] Ramchandran K, Xiong Zi-xiang, Asai K, et al. Adaptive Transforms for Image Coding Using Spatially Varying Wavelet Packets[J]. IEEE Transactions on Image processing, 1996, 5(7):1197-1204  
[10] Marpe D, Blattermann G, Maass R J. A two-layered wavelet-based algorithm for efficient lossless and lossy image compression[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology, 2000, 10(7):1094-1102  
[11] Cai Qi, Song Li, Li Gui-chun, et al. Lossy and lossless intra coding performance evaluation: HEVC, H. 264/AVC, JPEG 2000 and JPEG LS[C]//Signal & Information Processing Association Annual Summit and Conference (APSIPA ASC). 2012 Asia-Pacific. 2012;1-9  
[12] Wang Sheng. A Review of Gradient-Based and Edge Based Feature Extraction Methods for Object Detection[C]//IEEE, Computer and Information Technology (CIT). Paphos, Cyprus, 2011;277-282  
[13] Wang Z, Klaiber M, Gera Y, et al. Fast lossless image compression with 2D Golomb parameter adaptation based on JPEG-LS[C]//Signal Processing Conference (EUSIPCO). 2012;1920-1924  
[14] Avramovic A. Lossless compression of medical images based on gradient edge detection[C]//Proceedings of 2011 19th Telecommunications Forum (TELFOR). Belgrade, 2011;1199-1202  
[15] 陈宇拓. 基于相关模型的彩色图像编码与图像的 3D 建模研究[D]. 长沙:中南大学, 2008