

## 基于对象的三维医学图像形状自适应编码算法\*

吴家骥<sup>1,2+</sup>, 焦李成<sup>1,2</sup>, 石光明<sup>1,2</sup>, 王磊<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>(西安电子科技大学 智能信息处理研究所, 陕西 西安 710071)

<sup>2</sup>(西安电子科技大学 智能感知与图像理解教育部重点实验室, 陕西 西安 710071)

### Object-Based Shape-Adaptive Coding Method for Three-Dimensional Medical Images

WU Jia-Ji<sup>1,2+</sup>, JIAO Li-Cheng<sup>1,2</sup>, SHI Guang-Ming<sup>1,2</sup>, WANG Lei<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>(Institute of Intelligent Information Processing, Xidian University, Xi'an 710071, China)

<sup>2</sup>(Key Laboratory of Intelligent Perception and Image Understanding of Ministry of Education of China, Xidian University, Xi'an 710071, China)

+ Corresponding author: E-mail: wujj@mail.xidian.edu.cn

Wu JJ, Jiao LC, Shi GM, Wang L. Object-Based shape-adaptive coding method for three-dimensional medical images. *Journal of Software*, 2008,19(7):1635–1643. <http://www.jos.org.cn/1000-9825/19/1635.htm>

**Abstract:** The paper proposes a shape-adaptive wavelet coding algorithm for known object of diagnostic region of three-dimensional medical images. The new algorithm only applies to the shape-adaptive transformation of the pixels inside the object for decorrelation. After transformation, the number of coefficients of the object is as many as that of the pixels inside the image area. To achieve a quick and lossless transformation, a novel shape-adaptive wavelet transform based on lifting scheme for arbitrarily shaped object is proposed. By analyzing the location of invalid coefficients transformed, the paper also proposes a modified OB-3DSPECK (object-based set partitioned embedded block coder) method that cancels symbol outputs of invalid block or coefficients outside the object, specifically, only two types of symbols are output to arithmetic coding coder. For object region of three-dimensional medical images, the proposed algorithm supports the lossy-to-lossless embedded en/decoding. Experimental results show that the proposed algorithm outperforms OB-3DSPECK by 0.5dB on the average SNR. Furthermore, because of the reduction of the output of one type symbol, the arithmetic coding becomes optional.

**Key words:** shape-adaptive coding; embedded coding; objects-based coding; wavelet transform; SPECK (set partitioning embedded block)

**摘要:** 提出了一种针对三维医学图像已知诊断对象区域的形状自适应小波编码方法。该算法仅对对象区域内的像素应用形状自适应小波变换去相关,变换后,对象在变换域中的系数个数与图像域的像素保持相同。为了实现快速无损变换,提出一种基于提升的形状自适应小波变换方法。通过分析形状自适应变换后无效系数的位置,又提出一种改进的OB-3DSPECK(object-based set partitioned embedded block coder)算法,取消了对对象区域外无效块或系数的符

\* Supported by the National Natural Science Foundation of China under Grant Nos.60607010, 60672125, 60672126, 60736043, 60776795 (国家自然科学基金); the Program for Cheung Kong Scholars and Innovative Research Team in University of China under Grant No.IRT0645 (教育部长江学者和创新团队支持计划); the Natural Science Foundation of Hu'nan Province of China under Grant No.08JJ3123 (湖南省自然科学基金)

Received 2007-03-28; Accepted 2007-06-07

号输出,即只输出两种符号流到自适应算术编码器.对于三维医学图像的对象区域,该算法能够提供有损到无损的渐进编解码.实验结果表明,该算法平均 SNR 比 OB-3DSPECK 提高 0.5dB.此外,由于减少了一种符号输出,使得算术编码过程可选.

关键词: 形状自适应变换;嵌入编码;基于对象编码;小波变换;SPECK(set partitioning embedded block)

中图法分类号: TP391 文献标识码: A

对于典型的三维医学图像,人们从主观视觉角度来说,通常只对图像的某些特定区域更感兴趣,例如医学图像中的病灶区域.这些感兴趣的特定区域被称为对象区域或感兴趣区(region of interest,简称 ROI).在利用医学图像进行诊断时,对病灶对象区域重构质量要求非常高,甚至需要无损的重构;而对对象以外的非感兴趣区域,对图像重构质量要求较低.所以,在对医学图像进行编码时,可以对对象区域采用高质量的编码(甚至是无失真的编码),对对象区域以外的图像可以不编码.这样,在码率较低时,仍能保证对图像质量的要求.而不考虑图像内容的传统通用压缩算法很难胜任高压比下对图像高质量重构的要求.

最初,Atsumi<sup>[1]</sup>提出了一种基于SPIHT的比特面提升的ROI编码算法.随后,静止图像编码标准JPEG2000 也加入了对ROI编码的支持<sup>[2,3]</sup>.在JPEG2000 算法中,利用最大比特面提升(maxshift)方法实现对任意形状ROI的编码,而对于规则形状(矩形或椭圆形)ROI采用Scaling方法.上述传统ROI编码方法都存在一些不足:1) 因为小波变换被应用于整个图像,ROI区域和背景区域的图像是不可分离的,需要统一编码,并且由于小波滤波器长度的影响,变换域ROI内的系数个数大于图像域ROI内的像素个数,导致编码的实际系数要大于图像域中ROI的像素;2) ROI边界系数失真的传播效应会导致重构图像ROI边缘产生非常严重的“振铃”失真;3) 编码端需要比特面提升,解码端需要比特面反提升.

而在基于对象的形状自适应图像编码中,由于采用形状自适应变换,使对象区域以外的像素不参与变换,变换仅作用于对象区域内部,无需编码端的比特面提升和解码端的反提升.变换后仅对象内部系数参与编码,对象外部的系数无任何数值,不参与编码.当有多个对象时,各对象的形状和纹理被分别独立变换和编码.

基于对象的小波图像编码有两个关键技术:首先是基于对象的形状自适应变换.在传统的基于小波变换的图像编码中,双正交偶数长度的滤波器要求小波变换的区域必须是规则的矩形.为了实现不规则形状的二维小波形状自适应变换,Katata<sup>[4]</sup>等人提出了一种利用矩形填充的对象小波变换方法(object wavelet transform,简称 OWT).在OWT方法中,图像不规则边界处需要用像素填充,以使变换的行或列信号为偶长度.但由于边缘被填充为矩形,经过有损编、解码后的图像边缘有很强的边缘效应.

Egger<sup>[5]</sup>等人也提出了一种类似SA-DCT<sup>[6,7]</sup>的形状自适应小波变换方法.每次二维变换时首先要对所有列重新排序,然后分别对每列作一维小波变换.然后再对行重新排序并进行一维小波变换.该算法的缺点是,每次变换时都需要记录像素的空间位置,以便反变换时重构.

Li<sup>[8,9]</sup>等人提出了一种新的形状自适应小波变换方法(shape adaptive discrete wavelet transform,简称 SA-DWT).SA-DWT的优点是,非规则区域的像素在变换时不用重新排序,不用填充.在传统任意形状ROI小波变换中,实际变换域中各子带ROI的系数总和要多于图像域中的ROI的像素个数,这就增加了编码的开销.而SA-DWT变换前的像素数目与变换后各子带中的系数数目相同.在SA-DWT的实现中,对象区域的每一行和列都按照信号的不同位置和长度分别处理,如对奇位置-奇长度、奇位置-偶长度、偶位置-奇长度和偶位置-偶长度的信号分别采用不同的小波滤波处理方法.但是,由于SA-DWT是基于滤波的变换,所以,在处理不同位置和长度的信号时需要使用复杂的边界扩展.

基于对象的小波图像编码中另一个关键技术是对形状自适应小波变换后的小波系数实现高性能的编码.形状自适应变换后的小波系数包含 3 种类型:重要系数、不重要系数和边界以外的无效系数,这与传统的小波变换后生成的系数仅包含重要和不重要系数有所不同.Li在SA-DWT中采用改进的EZW(embedded zerotree wavelet coding)方法编码形状自适应变换后的小波系数.Penedo<sup>[10]</sup>等人则提出了一种基于SPIHT的OB-SPIHT(object-based SPIHT)算法.但是,由于形状自适应小波变换后,子带系数之间的关系并不完全符合树

形结构,比如,一个边界外的无效系数,它的子孙系数甚至有可能包含重要系数,这些都限制了OB-SPIHT等算法的性能.Lu等人提出了编码性能优于OB-SPIHT(object-based set partitioning in hierarchical trees)算法的OB-SPECK算法.与SPECK类似,OB-SPECK也是基于零块编码的一种算法,但该算法对SPECK算法做了改进,以适应对象编码的要求.

本文主要对上述算法做了两方面的改进:1) 提出了一种改进的基于提升的形状自适应变换.目前普遍采用基于滤波的形状自适应小波变换方法,但信号的起始位置和长度的不同导致滤波变换非常复杂,其中需要复杂的边界扩展判断等.本文采用基于提升的形状自适应小波变换,无需滤波变换中复杂的边界扩展和卷积计算,实现起来更为简单;2) 提出了一种改进的 2 符号输出三维 OB-SPECK 算法.在原始的 OB-SPECK 算法中,需要把对象区域以外的无效块和系数编码输出为独立的符号,并与比特面编码中产生的两种符号一起输入到自适应算术编码器中.而本文为了适应三维图像的编码,首先对 OB-SPECK 做了三维的扩展,提出了一种改进的三维 OB-SPECK 算法,该算法通过分析形状掩码图像中无效系数的位置,取消了对对象区域以外无效块或系数的符号输出,只需输出对象内系数重要性编码的两种符号码流到自适应算术编码器.由于减少了一种符号码流的输出,因此提高了编码性能.由于只有两种符号码流输出,可直接用二进制表示,使得自适应算术编码成为一种可选步骤,进而降低了系统复杂度.

### 1 基于提升的形状自适应小波变换

对象编码中,对象区域是不规则的.通常,为了确定对象的有效像素区域,需要用掩码(mask)图像划定对象形状,由于对病灶的自动判读还很不准确,所以目前医学诊断中图像的对象区域均由医生手工划定.为了简单表示掩码图像,对象区域外用 0 表示,对象区内用 1 表示.尽管能够通过形状自适应变换确定变换后各子带中的掩码形状,但通常都使用更简单的方法实现形状掩码的变换.图 1 为形状掩码快速变换的示意图,给出了一个任意形状对象的像素经过一级变换后系数在子带中的位置.形状掩码在变换时,把整个掩码按 4 个像素 1 组分为“LL,HL,LH,HH”,每经过一次二维变换,把每组像素按照它们的属性分配到各自的子带中即可.

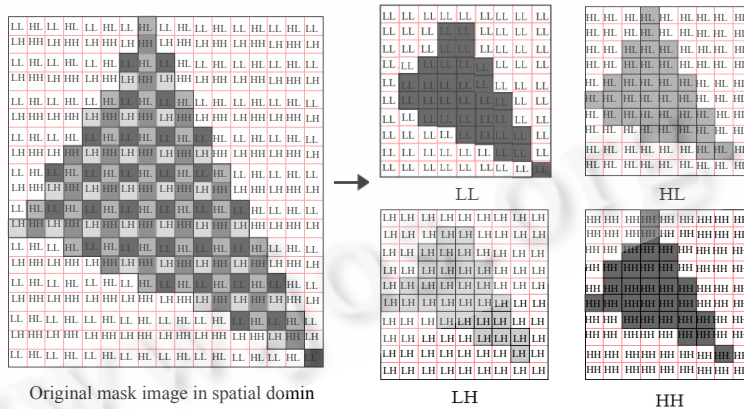


Fig.1 Decomposition of mask in shape-adaptive wavelet transform

图 1 形状自适应变换中的形状掩码分解

形状自适应小波变换与传统小波变换最大的不同是,形状自适应小波变换要处理长度不等的信号,其中有很多信号是奇数长度,甚至在图像的一些行或列中,信号是不连续的.

对于二维的形状自适应小波变换,可以分解为两个方向上分别进行.但在行或列的一维变换时,信号的第 1 个像素开始坐标可能是奇数,而且信号的长度也有可能是奇数,这就增加了变换的复杂性.我们把所有变换的信号按坐标开始位置和信号长度分为 4 种情况:(1) 偶位置-偶长度;(2) 偶位置-奇长度;(3) 奇位置-偶长度;(4) 奇位置-奇长度.

以 5/3 小波为例,图 2 给出了不同情况下形状自适应小波变换的一维提升方法.在每次对一个行或列变换

时,需要先确定该行或列中的各信号段的属性,然后再分别运用图 2 中的方法进行一维形状自适应提升.此前在图 1 中已经可以看到,与传统的小波变换不同,同一级形状自适应小波变换后的变换系数在低频子带和高频子带中并不是一一对应的.在图 2 中,一个“奇位置开始-奇长度”的具有 3 个像素值的信号,经过一级变换后,在低通子带只有一个系数,而在高通子带有两个系数.对于任意形状自适应变换的信号,变换前的像素个数与变换后各子带中的系数个数保持一致.

形状自适应小波变换中还会出现一种更为特殊的情况,那就是变换的信号长度仅为 1 个像素.当处理这种情况时,无论该像素的开始位置是奇位置还是偶位置,我们都把有效的那个像素直接放到相应的低频子带中,这样做是为了保证能量始终向低频子带集中,而高频子带的系数能量尽可能最小.

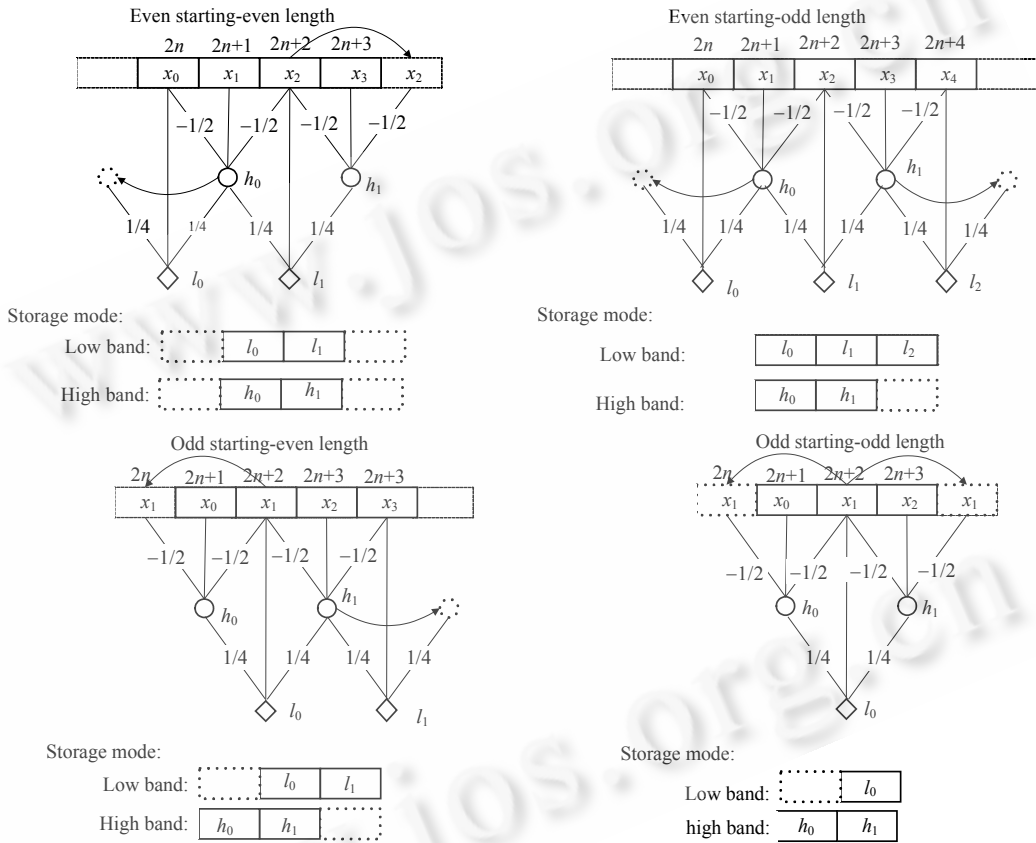


Fig.2 Various location starting and length signal segments using 5/3 lifting wavelet

图 2 不同位置开始,不同长度信号的一维 5/3 提升小波

## 2 改进的 OB-SPECK 算法

在传统的比特面零树和零块编码中,由于结点(或块)只有两种情况(重要或不重要),所以当遇到重要结点或系数时,编码器输出 1;而当遇到不重要结点或不重要系数时,编码器输出 0.但在面向对象的编码中则多了一种情况,即结点有可能是边界以外的无效结点.

对于 SPIHT 和 SPECK 算法,由于结点(或块)状态只有两种,所以可以不经算术编码即可输出码流.原始 OB-SPECK 算法定义了 3 种块状态(重要、不重要、无效),这样,比特面编码后不再直接输出 0 或 1,而是输出 3 种符号,把这 3 种符号通过自适应算术编码器,最终输出 0,1 比特流.

图 3 显示了一个位于对象边界处的 4x4 大小的零块,通过 OB-SPECK 编码后的输出示意图.根据图像的顺序,整个编码过程最终把 3 种符号共 18 个符号的符号流“1,1X11,101XX00010X10”输出给算术编码器,其中,X 表

示无效块或系数的输出.

通过分析发现,原始 OB-SPECK 算法有两个不足:(1) 由于需要输出 3 种符号,因此,该算法中算术编码步骤无法省略;(2) 对象边界处仍存在的大量无效块(或系数)需要被编码,无效块(或系数)的符号输出不仅增加了编码开销,也导致算术编码性能的降低.

为了改善 OB-SPECK 算法的编码性能,本文对 OB-SPECK 算法做了进一步改进.通过利用对象的形状掩码确定无效结点的位置,在编码无效块(或系数)时不用输出其符号.这样可以减少符号输出,提高编码性能.

图 4 显示了改进后的 OB-SPECK 算法的输出.其中,图 4(d)是该零块的形状掩码,图 4(a)~图 4(c)为零块分裂步骤和符号输出.可以看到,在图 4(c)中的 A,B 和 C 块在边界以外,但并没有输出.这是因为在编码这些块时,先与图 4(d)的形状掩码比较,判断该块是否在边界以外.如果在边界以外,则不输出任何符号,如果在边界内,则判断该块是否重要,并输出该块的重要性符号.

此外,图 4(c)中的 G 块也不输出任何符号.这是因为 D,E,F 和 G 的上一级零块(图 4(b)中的 H)已经输出了 1,说明 D,E,F 和 G 中至少有 1 个块是重要的;在编码 G 时,由上下文的信息可以发现,因为 D,E 和 F 都不重要,所以,G 即使不用输出任何符号,在解码时也能知道 G 是重要块.

改进后算法的另外一个优点是:输出的符号只有两个,这样,在自适应算术编码时能够获得更好的性能.当需要进一步降低算法复杂度时,可以省略自适应算术编码这一步骤.

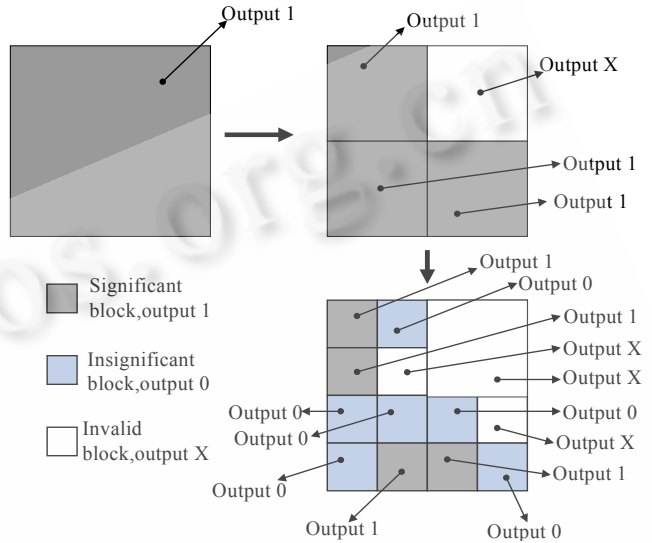


Fig.3 OB-SPECK zeroblock coding

图 3 OB-SPECK 零块编码算法

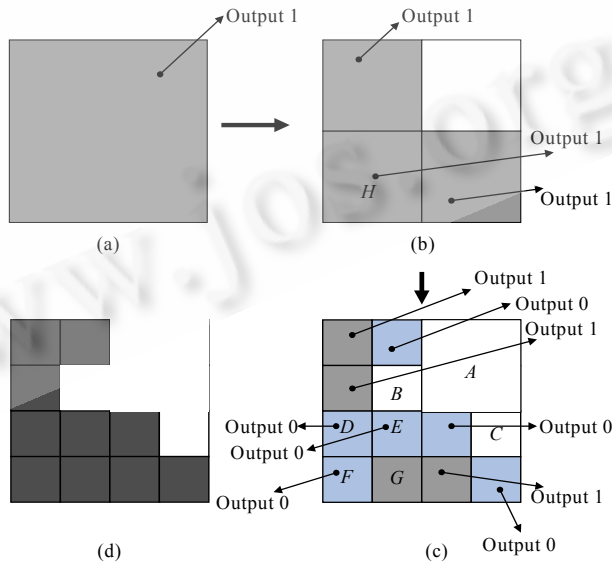


Fig.4 Modified OB-SPECK zeroblock coding

图 4 改进后的 OB-SPECK 算法零块分裂

### 3 三维图像形状自适应零块编码(OB-3DSPECK)

在三维医学图像的对象编码中,由于对象是在空间域中通过手工来划分的,也就是说三维图像所有帧中被划分的对象形状都是相同的,因此,在对这些三维对象编码时,首先按照文献[11]中的方法,对三维图像进行三维小波变换和三维零块分裂,其中,对空间域的小波变换运用本文的形状自适应小波提升变换方法.每个零块用  $S[(k,i,j)t,h,v]$  表示,其中,  $k,i,j$  表示零块的坐标位置,  $t,h,v$  表示零块的 3 个边长.在比特面编码时,对这些零块作迭代测试其重要性,如果零块中有重要系数,则对零块分裂.零块的分裂规则如下:

$$S' = \left\{ \begin{array}{l} s[(k,i,j)\lfloor t/2 \rfloor, \lfloor h/2 \rfloor, \lfloor v/2 \rfloor], \\ s[(k,i,j+\lfloor v/2 \rfloor)\lfloor t/2 \rfloor, \lfloor h/2 \rfloor, v-\lfloor v/2 \rfloor], \\ s[(k,i+\lfloor h/2 \rfloor,j)\lfloor t/2 \rfloor, h-\lfloor h/2 \rfloor, \lfloor v/2 \rfloor], \\ s[(k,i+\lfloor h/2 \rfloor,j+\lfloor v/2 \rfloor)\lfloor t/2 \rfloor, h-\lfloor h/2 \rfloor, v-\lfloor v/2 \rfloor], \\ s[(k+\lfloor t/2 \rfloor,i,j)t-\lfloor t/2 \rfloor, \lfloor h/2 \rfloor, \lfloor v/2 \rfloor], \\ s[(k+\lfloor t/2 \rfloor,i,j+\lfloor v/2 \rfloor)t-\lfloor t/2 \rfloor, \lfloor h/2 \rfloor, v-\lfloor v/2 \rfloor], \\ s[(k+\lfloor t/2 \rfloor,i+\lfloor h/2 \rfloor,j)t-\lfloor t/2 \rfloor, h-\lfloor h/2 \rfloor, \lfloor v/2 \rfloor], \\ s[(k+\lfloor t/2 \rfloor,i+\lfloor h/2 \rfloor,j+\lfloor v/2 \rfloor)t-\lfloor t/2 \rfloor, h-\lfloor h/2 \rfloor, v-\lfloor v/2 \rfloor] \end{array} \right.$$

这里,  $S'$  为新的零块集合,  $\lfloor \cdot \rfloor$  为取整符号.详细的三维零块编码算法见文献[11].

### 4 实验结果与分析

为了测试本文提出的改进OB-3DSPECK算法,Brain3D图像(如图 5 所示,分辨率为 256×256×200)和F13d-cor图像(如图 6 所示,分辨率为 512×448×60)作为测试图像(来源于Digital Jacket Pro软件),两个图像的灰度级都为 16 bpp(bit per pixel),对象区域均为手工选取.测试中也对比了原始OB-3DSPECK算法和AT-3DSPIHT-ROI算法,其中,AT-3DSPIHT-ROI算法是AT-3DSPIHT<sup>[12]</sup>算法采用传统ROI编码方法的实现.测试时图像按照 16 帧为一组分别编、解码,最终SNR结果为所有帧的平均值.所有测试图像时间轴方向采用 4 级 5/3 小波变换<sup>[2]</sup>,空间域采用图 2 所示的 5/3 形状自适应小波变换.

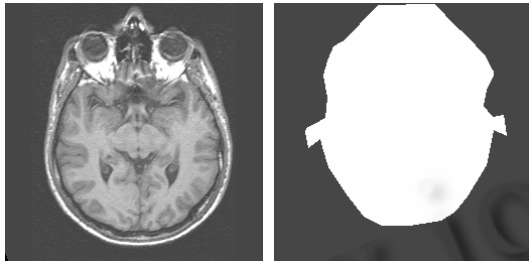


Fig.5 Frame 87 with mask of Brain3D and its original image

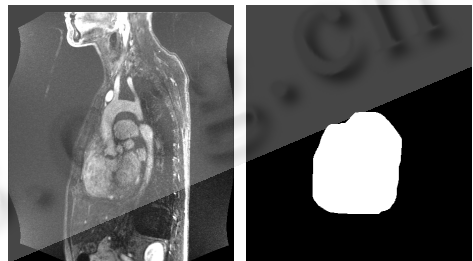


Fig.6 Frame 36 with mask of F13d-cor and its original image

图 5 Brain3D 中第 87 帧的原始图像和掩码图像

图 6 F13d-cor 中第 36 帧的原始图像和掩码图像

表 1 和表 2 给出了 3 种算法的有损编码性能.可以看到,对于图像 Brain3D,AT-3DSPECK-ROI 算法在低码率下 SNR 性能优于本文改进的 OB-3DSPECK 算法,但在高码率下,本文算法略优于 AT-3DSPECK-ROI 算法.对于测试图像 F13d-cor,本文算法在各码率下都优于其他算法.

Table 1 Lossy coding results (dB) of various methods for Brain3D

表 1 图像 Brain3D 在不同算法下的有损编码结果(dB)

SNR(dB)	0.2bpp	0.5bpp	1bpp	2bpp
NEW	18.28	23.56	30.15	39.21
OB-3DSPECK	17.74	22.91	29.24	38.81
AT-3DSPECK-ROI	20.43	25.00	30.17	37.32



**Table 2** Lossy coding results (dB) of various methods for F13d-cor

**表 2** 图像 F13d-cor 在不同算法下的有损编码结果(dB)

SNR(dB)	0.1bpp	0.2bpp	0.5bpp
NEW	22.68	26.40	36.55
OB-3DSPECK	22.18	26.13	36.05
AT-3DSPECK-ROI	22.62	25.85	33.12

为了保证诊断的准确性,在更多的情况下医学图像需要无损重构.从表 3 给出的对象区域无损编码性能可以看出,本文算法相比其他算法,具有更好的无损编码性能.

**Table 3** Lossless coding results (bpp) of various methods for Brain3D and F13d-cor

**表 3** 图像 Brain3D 和 F13d-cor 在不同算法下的有损编码结果(bpp)

bpp	Brain3D	F13d-cor
NEW	3.07	0.76
OB-3DSPECK	3.24	0.82
AT-3DSPECK-ROI	3.29	0.86

图 7~图 10 显示了 AT-3DSPECK-ROI 和本文算法在各码率下的重构图像.由于本文算法采用了形状自适应小波变换,重构图像的对象边缘无任何边缘效应.而 AT-3DSPECK-ROI 算法采用普通小波变换后,边缘失真的扩散导致重构图像的 ROI 边缘有很强的边缘效应.此外,在形状自适应小波变换的对象编码方法中,每个对象是独立变换和编码的,多个对象可叠加到一幅图像中.而传统的 ROI 编码算法由于 ROI 内外区域必须作整体变换,且编码在同一码流中,所以无法实现多 ROI 区域图像的叠加.

图 11 显示了 Brain3D 的三维原始图像和对象区域无损重构后的三维图像;图 12 显示了 F13d-cor 的三维原始图像和对象区域无损重构后的三维图像.可以看出,本文的基于对象的形状自适应编码算法对对象区域能够实现非常好的重构,而对对象外的像素由于未参与变换和编码,所以,重构后的图像中,对象外的像素无任何灰度信息.

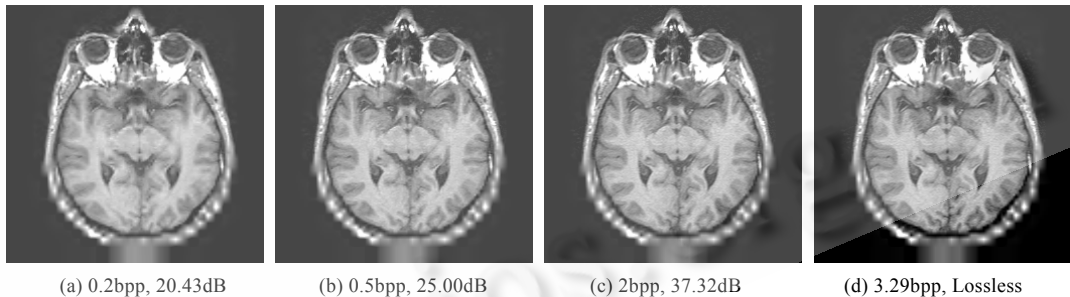


Fig.7 Four decoded images using AT-3DSPECK-ROI for Brain3D

图 7 Brain3D 在 AT-3DSPECK-ROI 算法下不同码率的重构图像

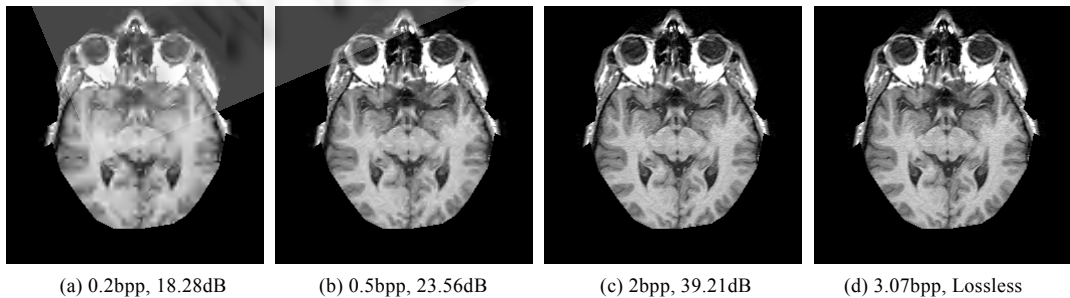
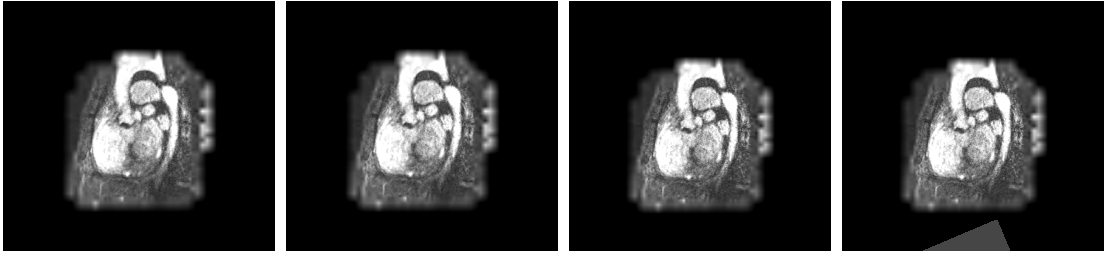


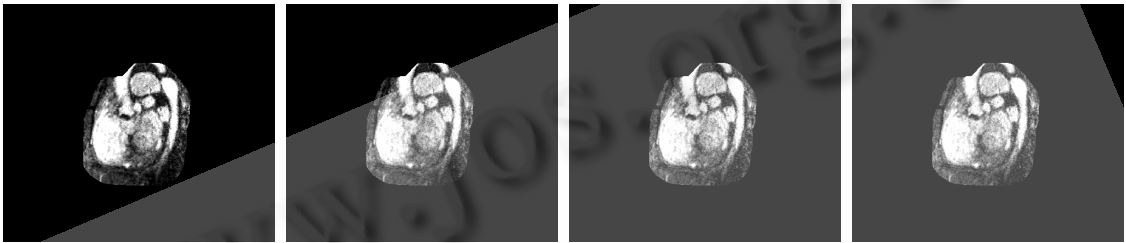
Fig.8 Four decoded images using modified OB-3DSPECK for Brain3D

图 8 Brain3D 在改进的 OB-3DSPECK 算法下不同码率的重构图像



(a) 0.1bpp, 22.62dB      (b) 0.2bpp, 25.85dB      (c) 0.5bpp, 33.12dB      (d) 0.86bpp, Lossless

Fig.9 Four decoded images using AT-3DSPECK-ROI for Fl3d-cor  
图 9 Fl3d-cor 在 AT-3DSPECK-ROI 算法下不同码率的重构图像



(a) 0.1bpp, 22.68dB      (b) 0.2bpp, 26.40dB      (c) 0.5bpp, 36.55dB      (d) 0.76bpp, Lossless

Fig.10 Four decoded images using modified OB-3DSPECK for Fl3d-cor  
图 10 Fl3d-cor 在改进的 OB-3DSPECK 算法下不同码率的重构图像

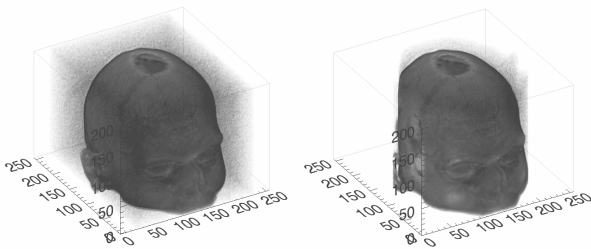


Fig.11 Original 3D images (left) and decoded 3D object images (right) for Brain3D  
图 11 Brain3D 的原始三维图像(左)和对象无损重构图像(右)

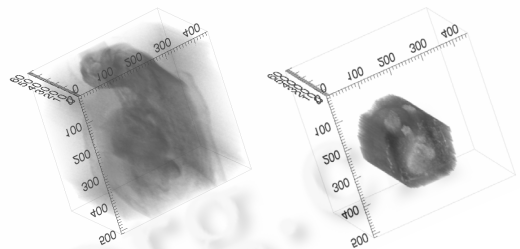


Fig.12 Original 3D images (left) and decoded 3D object images (right) for Fl3d-cor  
图 12 Fl3d-cor 的原始三维图像(左)和对象无损重构图像(右)

### 5 结束语

随着图像分辨率的提高,图像数据量的激增与存储空间和传输带宽的矛盾日益显著.基于对象的编码方法较好地解决了这一矛盾,基于对象的编码是目前比较热门的编码方法,它与传统的基于比特面提升的 ROI 编码方法有着本质的不同;采用形状自适应小波变换和编码,不仅具有较高的编码性能,而且重构图像主观效果更好.

本文提出了一种改进的基于提升的形状自适应小波变换方法.它不需要滤波算法中复杂的边界扩展,而且计算更为简单、快速.当应用其他小波基时,仅需采用相应的提升网络即可.此外,本文还提出了一种改进的 OB-3DSPECK 算法.该算法取消了无效块或系数的符号输出,并优化了零块编码,有效地提高了编码性能.由于只有两种符号输出到自适应算术编码器,自适应算术编码器的概率区间只需划分为两部分(原算法为 3 部分),进而提高了自适应算术编码器的性能.当需要降低算法复杂度时,也可以省略自适应算术编码这一步骤.



**致谢** 在此,我们向对本文的工作给予帮助的西安电子科技大学 ISN 国家重点实验室吴成柯教授、西安电子科技大学理学院吴振森教授表示感谢。

### References:

- [1] Atsumi E, Farvardin N. Lossy/Lossless region-of-interest image coding based on set partitioning in hierarchical trees. In: Proc. of the 1998 Int'l Conf. on Image Processing (ICIP'98). Chicago, 1998. 87–91.
- [2] JPEG 2000 part I final committee draft version 1.0. ISO/IEC JTC 1/SC 29/WG 1 N1646R.
- [3] JPEG 2000 part II final committee draft. ISO/IEC JTC 1/SC 29/WG 1 N2000, 2000.
- [4] Katata H, Ito N, Aono T, Kusao H. Object wavelet transform for coding of arbitrarily shaped image segments. IEEE Trans. on Circuits and Systems for Video Technology, 1997,7(1):234–237.
- [5] Egger O, Fleury P, Ebrahimi T. Shape-Adaptive wavelet transform for zerotree coding. In: Proc. of the Europe Workshop Image Analysis and Coding for TV, HDTV and Multimedia Application. Rennes, 1996. 201–208.
- [6] Sikora T, Makai B. Shape-Adaptive DCT for generic coding of video. IEEE Trans. on Circuits and Systems for Video Technology, 1995,5(1):59–62.
- [7] Sikora T, Bauer S, Makai B. Efficiency of shape-adaptive 2-D transforms for coding of arbitrarily shaped image segments. IEEE Trans. on Circuits and Systems for Video Technology, 1995,5(3):254–258.
- [8] Shipeng L, Weiping L. Shape-Adaptive discrete wavelet transform for coding arbitrarily shaped texture. In: Proc. of the Visual Communications and Image Processing'97. San Jose, 1997. 1046–1056.
- [9] Shipeng L, Weiping L. Shape-Adaptive discrete wavelet transforms for arbitrarily shaped visual object coding. IEEE Trans. on Circuits and Systems for Video Technology, 2000,10(5):725–743.
- [10] Penedo M, Pearlman WA, Tahoces PG, Souto M, Vidal J. Region-Based wavelet coding methods for digital mammography. IEEE Trans. on Medical Imaging, 2003,22(10):1288–1296.
- [11] Jiayi W, Zhensen W, Chengke W. Lossy to lossless compressions of hyperspectral images using three-dimensional set partitioning algorithm. Optical Engineering, 2006,45(2). <http://dx.doi.org/10.1117/1.2173996>
- [12] Tang X, Cho S, Pearlman WA. 3D set partitioning coding methods in hyperspectral image compression. In: Proc. of the ICIP 2003. 2003. II-239-42.



吴家骥(1973—),男,湖北沙市人,博士,讲师,CCF 高级会员,主要研究领域为静止图像编码,视频图像编码。



石光明(1965—),男,博士,教授,博士生导师,主要研究领域为智能信号,信息处理。



焦李成(1959—),男,博士,教授,博士生导师,CCF 高级会员,主要研究领域为非线性理论,人工神经网络,数据挖掘,非线性智能信号处理,进化算法,多用户检测。



王磊(1984—),男,硕士生,主要研究领域为图像编码。