

基于双提升小波变换的医学图像感兴趣区编码^①

Medical Region of Interest Image Coding Based on Two Different Lifting Wavelet Transform

陈军波 (中南民族大学电子信息工程学院 湖北武汉 430074)

王芳 (华中农业大学理学院 湖北武汉 430071)

摘要: 基于提升小波变换的感兴趣区域编码技术是静态图像压缩标准 JPEG2000 支持的一种非常重要的功能, 本文提出了一种对医学图像病灶(感兴趣)区域采用 5/3 提升小波变换, 对图像背景(非感兴趣)区域采用 9/7 提升小波变换的方法, 该方法与传统 JPEG2000 采用单一提升小波变换对医学进行压缩后的效果相比较, 具有更高的压缩性能。

关键词: 医学图像 感兴趣区域编码 提升小波变换

随着医院医疗与健康服务网络化和通信化的发展, 医学图像存档与通信系统 (PACS, Picture Archiving and Communication Systems) 将在远程医疗系统中发挥越来越大的作用。PACS 系统需要存储和传输大量的医学图像信息, 而医学图像具有大幅面、高分辨率, 大数据量等特性, 选择何种有效的数据压缩技术, 在有限的网络带宽或存储空间中传输或保存巨大的图像数据是目前医学图像急需解决的主要问题。新的静态图像压缩标准 JPEG2000 以高压缩性能、同时支持有损和无损压缩、可实现渐进式传输和感兴趣区域 (ROI, Region of Interest) 编码等特性为医学图像的压缩与传输提供了较好的解决方法^[1]。

1 JPEG2000 感兴趣区域 (ROI) 编码

压缩标准 JPEG2000 支持的感兴趣区域编码允许用户自定义图像中的关键区域 (医学图像中的病灶区域), 采用无损或近似无损压缩处理; 把图像中的其他部分定义为非感兴趣区域 (RONI, Region of non-interest), 采用高压缩比的有损压缩。该技术能保证不丢失重要信息的前提下, 最大限度地提高图像数据的压缩比, 若按照图像质量分级的渐进方式传输码流, 还能进一步增强图像的视觉效果。JPEG2000 标准选择提

升小波变换技术和具有最优截断的嵌入式块编码技术 (EBCOT, Embedded Block Coding with Optimized Truncation of the embedded bitstreams) 为核心算法^[2], 推荐使用 Daubechies 9/7 和 Le Gall 5/3 两种提升小波方法。这两种提升算法在高比特率压缩时具有相同的压缩效果, 但 L. 5/3 提升方法因滤波器抽头少, 需要编码的系数比特长度要比 D. 9/7 提升短, 而且 L. 5/3 提升变换后的小波系数是整形的, 因此, 在高比特率压缩情况下, 从实现的复杂程度来看, L. 5/3 比 D. 9/7 更具优势。但是在低比特率压缩时, D. 9/7 比 L. 5/3 的压缩性能要好得多^[1]。

JPEG2000 标准支持的感兴趣编码是一种频率系数提升的方法, 首先选用一种提升方法完成图像的小波变换, 然后对选定的 ROI 采用一般位移法 (Upscaling) 或最大位移法 (Maxshift) 进行位平面优先编码。为了获得更有效的医学图像压缩效果, 本文提出了一种对医学图像的不同区域交换使用两种不同的提升小波变换方法。由于两种提升小波的变换结构基本相同, 只是提升级数和小波滤波器系数略有差异, 因此可以选择 L. 5/3 用于病灶区 (ROI) 编码, 以方便地获得无损的压缩效果, 选择 D. 9/7 用于背景区 (RONI) 编码, 以获得较高的压缩性能。

① 基金项目: 中南民族大学自然科学基金 (NO. YZY05004)

2 ROI 编码中的提升小波变换

2.1 提升小波变换

提升小波变换与传统的基于卷积运算的第一代小波变换相比,具有运算量小,结构简单,可实现整系数运算等特点,成为图像压缩处理领域研究的热点。JPEG2000 压缩标准采用 D. 9/7 和 L. 5/3 两种提升格式的小波变换用于满足不同比特率的图像压缩,这两种小波变换的结构可用如图 1 所示的结构图表示。

对二值掩模图像为 1 的区域,即图像中的感兴趣区域,采用 L. 5/3 小波进行变换编码,二值掩模图像为 0 的区域,即非感兴趣区域(背景区)则采用 D. 9/7 小波进行编码。由于两种提升小波具有相同的结构,如图 1 所示,只是提升步骤和小波滤波器系数不同。在变换过程中,只需根据掩模区域的取值来切换滤波器的系数,ROI 区域和 RONI 区域的小波滤波器系数如表 1 所示。

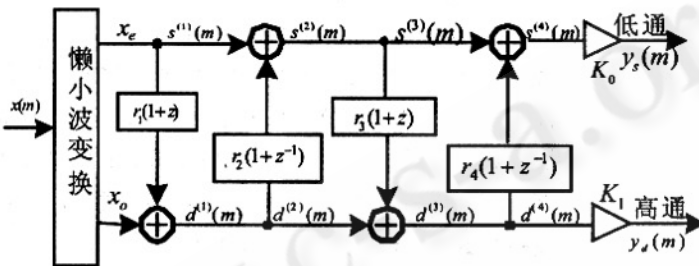


图 1 提升小波变换结构图

提升小波变换主要由三个步骤完成:分割、预测和更新。首先是“lazy”(懒小波)变换,把数据分为偶数集合 x_e 和奇数集合 x_o 两个子集;然后计算高通小波系数 $d^{(1)}(m)$,即用偶数集合来预测奇数集合的误差;第三步是用这些小波系数来更新偶数集合作为低通尺度函数系数 $s^{(1)}(m)$ 。D. 9/7 小波共需经过 4 级提升,而 L. 5/3 只需 2 级提升操作^[4], $i=1,2,3,4$ 。L. 5/3 提升步骤完成后,高通小波系数和低通小波系数分别为:

表 1 L. 5/3 和 D. 9/7 提升小波滤波器系数值

i	$r_i^{(N)}(D. 9/7)$	$r_i^{(R)}(L. 5/3)$
1	-1.586134342059924	-0.5
2	-0.052980118572961	0.25
3	0.882911075530934	0
4	0.443506852043971	0
i	$K_i^{(N)}(D. 9/7)$	$K_i^{(R)}(L. 5/3)$
0	0.812893066115961	1.00
1	0.615087052457000	1.00

$$y_{d,i}(m) = x(2m+1) - \left[\frac{x(2m) + x(2m+2)}{2} \right]$$

$$y_s(m) = x(2m) + \left[\frac{y(2m-1) + y(2m+1) + 2}{4} \right]$$

2.2 提升小波变换的选择

在对图像进行变换之前,根据需要选定图像中感兴趣的区域,产生一个与原图像大小相同的二值掩模图像 $M(m,n)$, $M(m,n)$ 定义为:

$$M(m,n) = \begin{cases} 1 \\ 0 \end{cases}; \text{式中 } 1 \text{ 为 ROI 区域, } 0 \text{ 为 RONI 区域。}$$

原图像和掩模图像经过小波变换后,按照 JPEG2000 标准分别对掩模区域的系数和无掩模区域采用不同的量化优先级进行编码,感兴趣区域小波变换的结果如图 2 所示。

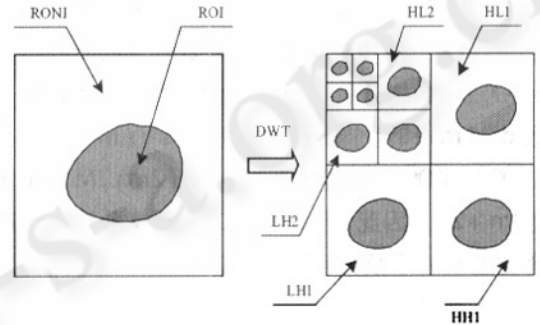


图 2 ROI 小波变换示意图

对不同区域的提升小波正变换和逆变换,可用图 3 所示的变换示意图来说明。假设像素 $x(2m)$ 为感兴趣区域像素,由该像素预测和更新生成的高通系数 $y_d(m-1)$ 、 $y_d(m)$ 和低通系数 $y_s(m)$ 属于 ROI 系数。从图 3 可以看出,ROI 掩模系数经 L. 5/3 小波变换得到,而其他系数经 D. 9/7 小波变换得到。根据图 3 小波的提升过程可知,ROI 中的某一像素(如 $x(2m)$) 经过提升小波变换后,生成 3 个子带系数(如 $y_d(m-1)$ 、 $y_d(m)$ 、 $y_s(m)$)。

在偶数提升阶段($i = \text{even}$),产生一个低频子带

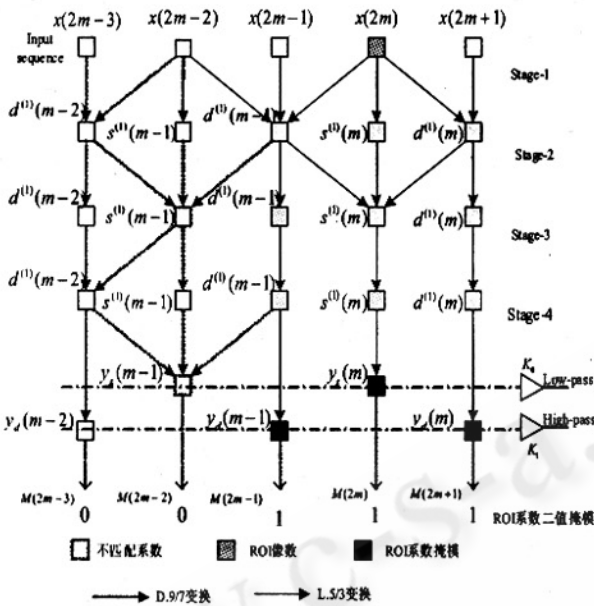


图 3 小波的提升过程与滤波器切换示意图

系数 $s^{(i)}(m)$ 和两个高频子带系数 $d^{(i)}(m)$ 、 $d^{(i)}(m-1)$ ，对应的 ROI 二值掩模系数为 $M(2m-1)$ 、 $M(2m)$ 、 $M(2m+1)$ ；奇数提升阶段 ($i = \text{odd}$)，产生一个高频子带系数 $d^{(i)}(m)$ 和两个低频子带系数 $s^{(i)}(m)$ 、 $s^{(i)}(m+1)$ ，对应的 ROI 二值掩模系数为 $M(2m)$ 、 $M(2m+1)$ 、 $M(2m+2)$ 。因此，可以根据二值掩模系数的状态来选择滤波器的系数，确定完成何种提升小波变换。

具体实现算法如下：

第一步：初始化，完成懒小波变换，即： $s^{(0)}(m) = x(2m)$ ， $d^{(0)}(m) = x(2m+1)$ 。如果图像像素数为 N ，则 $m = 0, 1, \dots, \lfloor (N/2) \rfloor$ 。

第二步：预测与更新，分两种情况。

① 奇数提升阶段，由 $M(2m)$ 、 $M(2m+1)$ 、 $M(2m+2)$ 的状态判断该像素是否属于 ROI。如果 $M(2m)$ 、 $M(2m+1)$ 、 $M(2m+2)$ 中有任两个连续的掩模系数为 1，则可判断该系数属于 ROI，选择 L.5/3 提升小波滤波器；否则，选择 D.9/7 提升小波滤波器，滤波器系数如表 1 所示。并计算：

$$s^{(i)}(m) = s^{(i-1)}(m)$$

$$d^{(i)}(m) = d^{(i-1)}(m) + r_i \sum_{k=0}^1 s^{(i-1)}(m+k)$$

在小波的提升变换过程中，如果直接按照 ROI 的二值掩模来切换滤波器的系数，位于 ROI 边界的像素，会产生两种滤波结果（如图 3 中虚线框所示），出现系数不匹配，导致 ROI 轮廓畸变。比如当 $M(2m) = 0, M(2m+1) = 1, M(2m+2) = 1$ 或 $M(2m) = 1, M(2m+1) = 1, M(2m+2) = 0$ 时，会出现 ROI 与 RONI 边界。为确保 ROI 图像边缘不产生失真，可以采用了以下对称扩展的方法去除畸变：

$$\begin{cases} s^{(i-1)}(m) \leftarrow s^{(i-1)}(m+1); & M(2m)M(2m+1)M(2m+2) = 011; \\ s^{(i-1)}(m+1) \leftarrow s^{(i-1)}(m); & M(2m)M(2m+1)M(2m+2) = 110; \end{cases}$$

② 偶数提升阶段，由 $M(2m-1)$ 、 $M(2m)$ 、 $M(2m+1)$ 的状态判断该像素是否属于 ROI。如果 $M(2m-1)$ 、 $M(2m)$ 、 $M(2m+1)$ 中有任两个连续的掩模系数为 0，则可判断该系数属于 RONI，则选择 D.9/7 提升小波滤波器；否则，选择 L.5/3 提升小波滤波器系数，滤波器系数如表 1 所示。并计算：

$$s^{(i)}(m) = s^{(i-1)}(m) + r_i \sum_{k=0}^1 d^{(i-1)}(m-k)$$

$$d^{(i)}(m) = d^{(i-1)}(m)$$

同样在当 $M(2m-1) = 0, M(2m) = 0, M(2m+1) = 1$ 或 $M(2m-1) = 1, M(2m) = 0, M(2m+1) = 0$ 时，会出现 RONI 和 ROI 边界，为防止边缘不失真，采用以下扩展方法：

$$\begin{cases} d^{(i-1)}(m) \leftarrow d^{(i-1)}(m-1); & M(2m-1)M(2m)M(2m+1) = 001; \\ d^{(i-1)}(m-1) \leftarrow d^{(i-1)}(m); & M(2m-1)M(2m)M(2m+1) = 100; \end{cases}$$

第三步：输出变换结果，当 $m = 0, 1, \dots, N/2 - 1$ 时，

① 如果 $M(2m) = 1$ ，则输出： $y_s(m) = K_0^{(R)} \cdot s^{(4)}(m)$

否则输出： $y_s(m) = K_0^{(N)} \cdot s^{(4)}(m)$

② $M(2m+1) = 1$ ，则输出： $y_d(m) = K_1^{(R)} \cdot d^{(4)}(m)$

否则输出： $y_d(m) = K_1^{(N)} \cdot d^{(4)}(m)$

逆变换可由上述相反步骤完成。

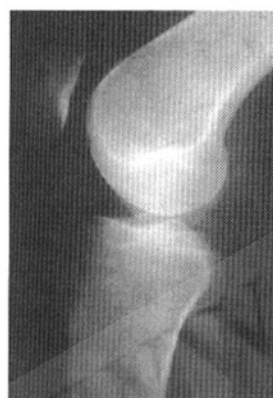
3 ROI 编码步骤

按照上述方法分别完成感兴趣区域和背景区域的小波变换后，按照 JPEG2000 标准，选用最大位移法 (Maxshift) 进行位平面编码^[5]。首先扫描所有量化后的小波系数，使 ROI 的位平面系数上移 s ，使得提升因子 s 满足下面的关系：

$$2^s \geq \min(Cb),$$

表 2 不同比特率下三种 ROI 编码峰值信噪比

图像 区域	比特率(bpp)				
	0.1	0.2	0.48	1.0	2.0
D.9/7	24.24	29.57	35.03	41.14	49.83
L.5/3	24.83	31.02	35.40	41.36	50.34
L.5/3-D.9/7	24.95	31.75	35.90	42.01	51.17



图(a) 原图像



图(b) L.5/3-D.9/7 ROI编码



图(c) L.5/3 ROI编码



图(d) D.9/7 ROI编码

图 4 ROI 编码结果比较

这里 $\min(C_b)$ 为任意子带中 RONI 系数的最小整数, 经过提升后, 使位平面上的所有 ROI 系数都高于 RONI 系数, 并进行优先无损的编码。

编码步骤如下:

- ① 在原医学图像中定义 ROI 区域;
- ② 生成相应的二值掩模;
- ③ 完成对不同区域的提升小波变换;

- ④ 对不同区域的小波系数进行量化;
- ⑤ 按照最大位移法对 ROI 系数进行提升;
- ⑥ 完成量化系数的 EBCOT 编码。

4 实验结果与讨论

按照本文提出的针对不同区域采用不同提升小波变换方法, 对一幅骨骼医学图像进行了压缩处理。并与单独使用 L. 5/3 提升小波变换、D. 9/7 提升小波变换进行压缩处理后的图像进行了比较, 在压缩率为 0.2 bit/pixel 时重建图像的效果如图 4 所示, 三种小波变换进行 ROI 编码后的峰值信噪比 (PSNR) 如表 2 所示。

感兴趣区域编码是静态图像压缩标准 JPEG2000 支持的一种图像处理新技术, 该技术为医学图像的高性能压缩提供了较好的解决方案。由于在小波变换过程中, 需要判断图像像素是否属于感兴趣区域来选择小波滤波器, 和 JPEG2000 标准支持的 ROI 编码算法相比较, 该算法要复杂一些。但在低比特率压缩下, 该方法能有效提高医学图像的压缩性能。

参考文献

- 1 Majid Rabbani, Rajan Joshi. An overview of the JPEG2000 still image compression standard[J], Signal Processing: Image Communication 17(2002): 3-48.
- 2 ISO/IEC FCD15444-1, JPEG2000 Image Coding System, March 2000.
- 3 Atsumi, E.; Farvardin, N. Lossy/lossless region-of-interest image coding based on set partitioning in hierarchical trees[C], Image Processing, 1998. ICIP 98. Proceedings. Volume 1, 4-7 Oct. 1998 Page(s).
- 4 Fukuma, S., Ikuta, S., et al. An ROI image coding based on switching wavelet transform[C], Circuits and Systems, 2003. ISCAS 03. Proceedings of the 2003 International Symposium on, Volume 2, 25-28 May 2003 Page(s): II-420 - II-423 vol. 2.
- 5 Yang, H.; Long, M.; Tai, H.-M. Region-of-interest image coding based on EBCOT[J], Vision, Image and Signal Processing, IEE Proceedings, Volume 152, Issue 5, 7 Oct. 2005 Page(s): 590-596 Reference 3.