

# PACS 中的三维小波图象压缩

王 莉 王思贤 李 辉 曾发龙

(武汉大学图象及信息技术研究所, 武汉 430072)

**摘 要** 满足医学影像临床诊断需要的无失真压缩编码技术的研究是图象压缩研究的新领域,也是 PACS 系统和远程医疗诊断系统研究的热点之一。该文提出将三维小波压缩技术应用于 CT、MRI 等所产生的多帧断层图象,把二维医学序列图象组视为三维图象进行了研究,并提出了一套完整的、切实可行的三维小波压缩方案。通过实验证明,三维小波压缩技术大大优于目前 PACS 中最常用的二维 JPEG 编码和二维小波压缩技术。

**关键词** 图象归档与通信系统(PACS) 三维小波变换 图象压缩 频率子带 最优比特分配

## 0 引言

随着图象归档与通信系统 PACS(Picture Archiving and Communication System)的发展。开展适合医学影像的压缩编码技术成为 PACS 的热点之一。

PACS 中诸如 CT、MRI 等重要成象设备的实际成象特点是:一次检查会产生多帧图象,这些图象都是对人体的某一部位不同层面的断层图象,因此,相邻帧之间有较强的相关性。这样,PACS 中经常采用的二维 JPEG 编码技术无法很好地适应这类成组图象。我们将近年来在编码学领域大显身手的二维小波变换推广到三维,找到一种适合于 PACS 中成组图象的有效的压缩方案。实验证明,将二维小波压缩推广至三维,可以较好地去除帧间相关性,得到适合 PACS 的图象压缩方案。

## 1 三维小波压缩的方案

小波压缩的基本思想就是利用小波离散变换将图象分解为不同方向的频率子带,根据人眼的视觉特性,通过对不同方向子带进行不同的量化取舍来达到数据压缩的目的。这一点,大家在二维小波压缩的实践中已经了解。那么,三维小波压缩也就是将二维小波变换推广至三维,利用三维小波变换将图象分解为不同方向的频率子带<sup>[2-4]</sup>。显然,我们无法对一幅二维平面图象进行三维小波分解。CT 成象时一次检查产生的相邻的多帧二维图象作为成组图

象,可以被视为三维图象,这样就可以描述图象三维分解的模型了。如图 1 所示。

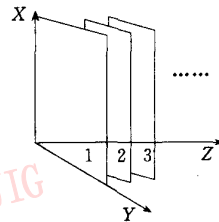


图1 图象三维小波分解方向选取

对成组图象进行三维小波变换后,接下来是低频子带处理、高频量化和熵编码三个部分。在具体的实验过程中,我们分别采用了 S+P 变换编码技术<sup>[6]</sup>,求出了一种三维小波分解的最佳量化方案,并采用了算术编码与 Huffman 编码相结合的熵编码方案,对 16 帧腹部图象进行了实验。图 2 就是我们设计的三维小波压缩的最终方案。

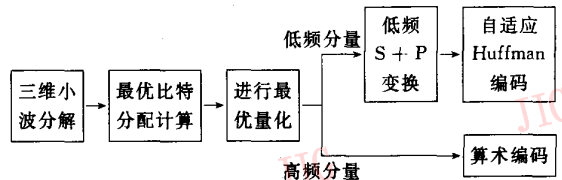


图2 PACS 中三维小波压缩的最终方案

## 2 三维小波压缩

### 2.1 三维小波基的选取

很多的文献为了实现的便捷,往往使帧间小波

基与帧内小波基一致。但是从医学图象的实际情况出发,帧间小波基的选用标准与帧内小波基并不一样。目前国内CT检查一般是一次成象10—20帧,帧间距为10mm左右,在纵深方向进行第三维小波变换时输入信号的长度限制在10—20个像素之间。由于实际变换中存在边界效应,运算中带来误差。在实际测试中我们发现,由于CT图象的纵深方向像素数较少,边界效应所带来的误差影响和帧内并不一致。因此,纵深方向小波基的选取不应该简单地和帧内等同。

我们对所有参加测试的小波基进行了细致的比较,主要关注的是恢复图象的质量和分解后的信息熵,最终选取的小波基为帧内Antonini,帧间Villa 4。这种组合形成的变换系数信息熵接近最低而恢复图象的质量却最好。

## 2.2 三维小波分解级数

考虑到CT图象的特点,纵深方向像素数较少,如果进行多级三维分解,纵深方向的像素数将更少,延拓误差也会相应更大,因此选择分解级数时必须考虑到这个影响。我们在实际测试时发现,当对16帧图象进行二级分解时,重建的图象质量不能令人满意。基于此,我们最终确定的三维小波分解级数为1。

## 2.3 低频子带的处理方案

小波分解后的低频子带包含了原始图象的大部分信息,它对恢复图象的质量起着决定性的作用,因此很多文献中都采取不带量化器的无失真差值脉冲预测编码(DPCM)方案对其进行处理。Amir在1996年提出了一种基于S变换(sequential transform)的预测编码方案(S+P-Transform)<sup>[6]</sup>。通过大量实验我们发现对CT测试图象而言,它的表现要优于DPCM。同时,由于该方案也是将原始图象分解成不同方向的子带,这使得我们有可能将变换后的系数同小波变换后的高频系数组成统一的数据结构,从而达到进一步去除相关性的目的。此外,我们发现这种方法可以仅通过简单的移位运算来实现,因此避免了复杂的浮点运算,使得实现起来快速便捷。因此,在无失真编码部分,我们的最终方案中将采取S+P变换。

## 2.4 三维小波变换的量化方案

三维小波变换后分解为各层子图象 $\{P_j, D_j^i\}$ ,

$D_j^2, \dots, D_j^7, 1 \leq j < J\}$  ( $J$ 为分解级数)。我们使用 $\epsilon_j^i$ ,  $\epsilon_j^2, \dots, \epsilon_j^7, 1 \leq j < J$ 表示量化 $D_j^1, D_j^2, \dots, D_j^7, 1 \leq j < J$ 时的量化误差,用 $\epsilon_j, 1 \leq j < J$ 表示 $P_j, 1 \leq j < J$ 的恢复误差。在一维小波变换中,恢复误差的MSE是低频信号和高频信号两个量化误差的和<sup>[5]</sup>。

上述结论可以扩展到三维,三维小波变换实际上是不同方向上的三次一维小波的组合,即使我们在 $z$ 方向上选择了不同的小波基,但双正交的性质是不变的。由于在三维情况下,我们是通过 $P_j, D_j^1, D_j^2, \dots, D_j^7$ 来恢复得到 $P_{j-1}$ ,于是

$$\epsilon_{j-1} = \epsilon_j + \epsilon_j^1 + \epsilon_j^2 + \epsilon_j^3 + \epsilon_j^4 + \epsilon_j^5 + \epsilon_j^6 + \epsilon_j^7 \quad (1)$$

再对上式进行递推运算,得

$$\epsilon_{j-1} = \epsilon_j + \sum_{i=j}^J \sum_{k=1}^7 \epsilon_i^k \quad (2)$$

显然当 $j=1$ 时它代表系统恢复误差的MSE。

我们将一种子带最优比特分配方法<sup>[5]</sup>与式(2)结合起来,推广至三维小波变换,最终得到均匀量化后的最优比特分配结果:(假设 $D_j^i$ 和 $P_j$ 在 $Q_j^i$ 和 $Q_j$ 范围内均匀分布, $\Delta_j^i$ 为 $D_j^i$ 的均匀量化步长, $\Delta_j$ 为 $P_j$ 的均匀量化步长,给各子图象分配 $R_j^i$ 比特/像素的码字,给 $P_j$ 分配 $R_j$ 比特/像素的码字)

$$R_j^i = \bar{R} + \frac{3}{2}j - \frac{3}{2} * \frac{8}{7} * \left(1 - \frac{1}{8^j}\right) + \frac{1}{2} \log_2 \frac{Q_j^i}{Q} \quad (3)$$

$$R_j = \bar{R} + \frac{3}{2}J - \frac{3}{2} * \frac{8}{7} * \left(1 - \frac{1}{8^J}\right) + \frac{1}{2} \log_2 \frac{Q_j}{Q} \quad (4)$$

其中,  $K = (K_j)^{8^{-j}} \prod_{j=1}^J \prod_{k=1}^7 (K_j^k)^{8^{-j}}$

$$Q = (Q_j)^{8^{-j}} \prod_{j=1}^J \prod_{k=1}^7 (Q_j^k)^{8^{-j}}$$

$$\Delta_j^i = Q_j^i 2^{-R_j^i}, \quad \Delta_j = Q_j 2^{-R_j} \quad (5)$$

式(3)和式(4)就是实际工作中我们得出的三维小波编码系统的最优比特分配方案。式(5)表示量化步长。从式中不难看到,最优分配取决于图象分解后各子带的灰度分布区间以及分解级数和要求达到的比特率,而前者是随着图象改变而改变的,可以通过计算各子带的信息熵而便捷地得到,因此是始终与图象的具体内容相关的。这种最优量化器显然要比固定的量化器优越。

在该最优方案中,低频子带同样是需要进行量化的,而最高频分量也不是简单地置0。这与其它基于

小波的医学图象压缩方案中低频无失真真是不同的。

## 2.5 变换系数的熵编码方案

在量化后的熵编码阶段,我们着重考虑了 Huffman 编码、自适应 Huffman 编码以及近几年异军突起的算术编码,这三者各有长短。

通过对比测试表明,在编码前信源信息熵较低时(这正是三维小波分解后高频系数的特征),算术编码比 Huffman 编码具有十分明显优势。在某种概率分布情况下(即信源数据流中某符号的概率很高时),优势尤为突出。特别适合应用于小波分解后的高频系数,因为小波分解后的高频部分会出现 0 系数频率较高的情形。

但是低频子带保留了原始图象的绝大部分信息,其信息熵的值不会像同级的高频子带那样低,算术编码在这种情况下就不一定优于 Huffman 编码。通过实验分析,在低频子带,自适应 Huffman 编码表现是最好的,这是因为低频子带是原始图象的精确图象,其灰度分布比较平均,算术编码的优势就不容易体现出来了。

因此,在最终的熵编码方案中,我们选择了根据不同的子带的特性采取不同的熵编码方式,而不是像某些文献中建议的那样只简单地选用某一种熵编码器<sup>[2,3]</sup>。从实验结果看,这种综合熵编码器在不同的质量等级上始终保持 94%—95% 的编码效率,而没有像使用单一编码器那样,编码效率会随着压缩比的提高而下降,其收益是十分明显的。

## 3 实验结果

我们选取了 CT 图象(层距 10mm 腹部一组,每组 16 帧,256 级灰阶),用图 2 所示的方案进行了实验。由于目前还没有比较成熟的三维医学图象组编码手段,因此评价压缩效率时的对比对象主要是成熟的二维 JPEG 压缩技术和二维小波压缩技术。

通过请医生做主观评价的方法,我们将最后的压缩门限界定在 33db。在这个门限附近,二维 JPEG 编码的压缩比一般在 5.0 左右。目前用于衡量图象质量的客观评价参数主要是均方差(Mean Square Error, MSE)和峰值信噪比(Signal to Noise Ratio, SNR)。

以这两种客观评估参量为标准,我们的实验结果如下:

表 1 腹部图象组的压缩比对比

测试图象	均方差 (MSE)	信噪比 (PSNR-MSE)	压缩比
3D-Wav	27.6	33.71db	7.39
2D-Wav	27.6	33.71db	5.28
2D-JPEG	27.7	33.69db	5.01

我们可以看到使用三维小波压缩技术对图象压缩比的提高是很明显的。在压缩门限处,腹部图象组的压缩比二维 JPEG 提高了 47.29%,比二维小波压缩提高了 39.96%。另外,从所附的实验图象中我们可以看出(见附图 1—3),在 33db 的压缩门限处,恢复图象的质量很好;而在相同的压缩比时,恢复图象与原始图象的差值图象明显地表明,应用三维小波压缩方法更多地保留了原始图象信息,可见在相同压缩比下提高了恢复图象的质量。

## 4 总 结

本文研究了 PACS 中的三维小波压缩,提出了一套切实可行的三维小波压缩的方案。在满足医学图象失真要求的条件下,大大提高了压缩比。与国内外相关文献相比,本文分析了三维医学图象组的特点,仔细测试了各种小波基在三维分解时的表现,从而分析得到了在选择 Z 方向小波基时必须考虑的因素并在考虑我们目前放射医学发展的现状的基础上确定了分解级数的限制。并通过数学推导,提出了科学合理的三维小波分解的最优化方案,提出的混合熵编码方案充分考虑了不同熵编码器在不同频率子带、不同质量等级的表现,使得实际编码效率在不同压缩比下保持一致而高效。

## 参 考 文 献

- 1 林 源. 图象归档与通信系统中的图象压缩[学位论文]. 武汉大学, 1996.
- 2 Wang Jun, Huang H K. Medical image compression by using three-dimension wavelet transform. IEEE Transactions on Medical Imaging, 1996, 15(4): 547~554.
- 3 Wang Jun, Huang H K. Three-dimensional medical compression using a wavelet transform with parallel computing. SPIE, 2431: 162~172.
- 4 张文忠, 沈兰荪. 一种新的 3-D 小波变换图象编码方法. 电子学报, 1997, 25(10).
- 5 李 涛等. 基于小波变化的图象编码中的噪声分析和优化比特分配. 中国图象图形学报, 1997, 2(8,9).

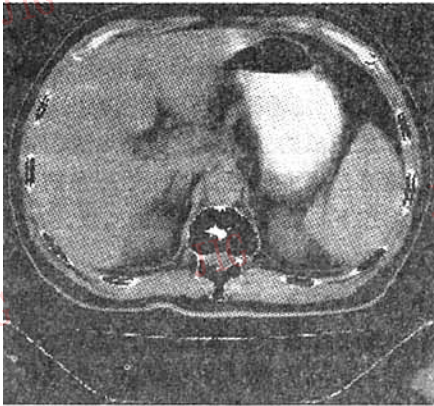
6 Amir Said, Pearlman W A. An image multiresolution representation for lossless and lossy compression. IEEE Transactions on

Image Processing, 1996, 5(9): 1303~1310.

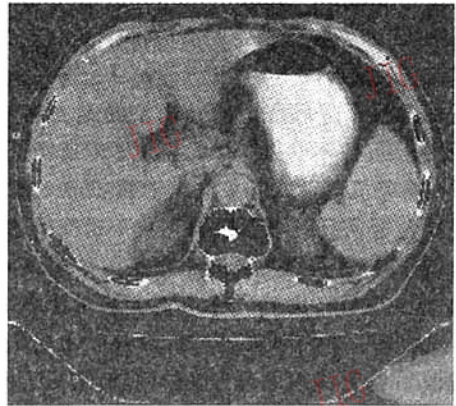


王莉 武汉大学电子信息工程系97级硕士生。主要研究方向为计算机图象处理。

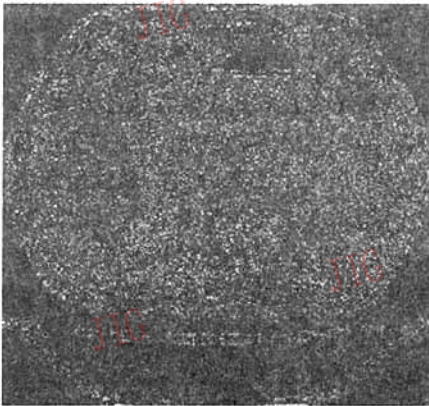
王思贤 武汉大学电子信息工程系副教授。主要研究方向为计算机图象处理, 模式识别与人工智能等。



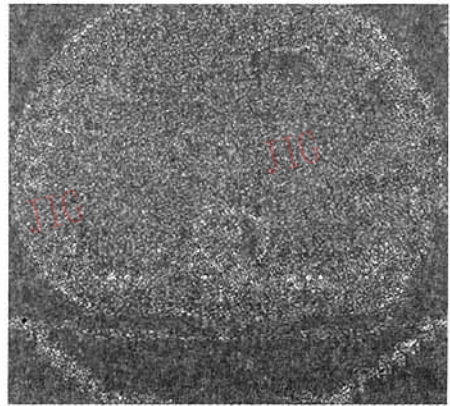
附图1 腹部CT原始图象



附图2 腹部CT恢复图象(33db)



腹部原始图象-腹部恢复图象  
三维小波压缩 5.01



腹部原始图象-腹部恢复图象  
二维JPEG 编码 5.01

附图3 相同压缩比时两种编码方法的不同差值图象(腹部)

## Image Compression in PACS Based on 3D Wavelet Transform

Wang Li, Wang Sixian, Li Hui and Zeng Falong

(Image Processing Lab of Wuhan University, Wuhan 430072)

**Abstract** Research on non-noise coding method serving the needs of medical diagnosis is a new field in PACS, CT and MRI scanners provided lots of 3D images every day. In this paper, a three-dimensional medical images compression method based on 3D wavelet transform is proposed. The 2D medical image group is regarded as 3D image. The authors expatiate on several questions which must be paid attention to in 3D wavelet transform, and an integrity 3D wavelet transform coding method is proposed. The experimental result shows this 3D coding method can offset the failure of 2D coding method in PACS perfectly.

**Keywords** Picture Archiving and Communication System, 3D wavelet transform, Image compression, Frequency subband, Best bite allocation

### 首都之窗“网上北京通”开通暨 “百姓网上绘北京”发布会

北京市政府信息化工作办公室于1999年5月19日召开发布会,宣布“首都之窗”政府网战开通“网上北京通”栏目,并发起“百姓网上绘北京”活动。

北京市政府网站“首都之窗”(网址为 <http://www.beijing.gov.cn>)自1998年12月正式开通以来,得到首都各界人士的热烈欢迎和全国各兄弟城市的热忱关注。目前上网的北京市委、办、局已达到40多家,市政府办公厅等多家单位近期内陆续上网。

“首都之窗”在传播政府声音,发布政府的方针政策,开放面向社会的公众信息,提供社会查询渠道,建立网络信访机制,推行政务公开,密切政府与市民的联系等方面已发挥了较好的作用。

据了解,无论是电子政务、电子商务、百姓出行、城市建设等各种信息都是与地理位置相关的,都涉及到它们的空间位置。利用计算机与网络通信技术的数字地图可以把一个城市详尽地数字化,在网上建立一座“数字的城市”。在城市中所发生的一些信息,譬如交通改道、旧房拆迁、城市绿化、单位地址等都可在这张数字地图上表示出来,人们信息交流就有了一种非常形象直观的媒介。

“首都之窗”开辟的以地理信息发布、浏览、查询为特色的专栏“网上北京通”(网址为 <http://map.beijing.gov.cn>),包括了1:2.5万比例尺北京城区详图,3400多个地名路名,1400多个小区,300个旅游景点图文介绍,约1万个企事业单位信息,1000个房地产项目,400多条公交线路,还有最新的火车时刻表,邮政编码及长话区号。它具有北京纵览、公用信息、观光旅游、公共交通、京城向导、企事业、房地产、用房标注及政府公告九个子栏目。在这些栏目里,京城老百姓可方便地浏览旅游景点,查询道路、小区、公交线路、立交桥、地铁、长途汽车站,还可以查询企事业,查询房地产项目。

“百姓网上绘北京”的活动,是利用“网上北京通”允许人们在这个数字地图上标注图形,发布信息的突出特点,为政府、百姓、企业、事业单位提供交流信息的可视化公用平台。各级国家机关、企事业单位可在上面发布相关信息,从而使这张地图成为活的地图,内容及时更新和增加,并不断丰富。建议首都市民和各单位积极参与画一张内容丰富,越用越新的地图。让“数字化北京”成为全民共同参与的行动。以推广和普及地理信息系统,促进资源共享。

“网上北京通”是由原地矿部所属北京长地计算机公司与国家遥感工程技术中心联合开发的,在首都公用信息平台提供的网络环境下运行。该软件具有自主知识产权,具有大面积推广的条件。也可作为国家机关的局域网或Internet网络用户的地理信息平台。