

基于 D^2 PCM 的数字减影图象序列无损压缩算法*

纪震 牟轩沁 蔡元龙

(西安交通大学图象处理与识别研究所, 西安 710049)

蒋大宗

(西安交通大学生物医学工程所, 西安 710049)

摘要 充分利用数字减影(DSA)图象序列在时间域上的减影图象之间仍然存在一定的相似性,提出了一种基于二阶差分PCM(D^2 PCM)的编码方式。该方法在空间坐标与时间坐标上构成了一个二阶差分,能够有效地减少图象在空间以及时间域上的冗余度,从而实现对 DSA 序列的无损压缩,减少了存储空间与传输时间。实际应用证明该算法是稳定和实用的。

关键词 DPCM D^2 PCM DSA 图象序列 无损压缩

0 引言

大量的医学数字成像系统和数字化设备的广泛使用使得数字影像的数量增长得非常庞大,3D 和 4D 医学影像序列在 MRI、CT、DSA 和 PET 设备日益普及的情况下已经非常常见,这对于影像的存取、管理、传输和处理都带来了极大的问题,因而医学影像压缩方法的研究被广为重视,而医生对于 PACS(Picture Archiving and Communication System)和远程诊断日益产生的兴趣更对高效的压缩方法有了迫切的要求。由于有损压缩导致医学影像的质量下降可能带来诊断上的错误,所以从法律角度看就显得非常敏感。诊断医生希望得到的是质量没有损伤的影像,但无损压缩的压缩效率又不能满足实际需要。国外研究人员目前已经在有损和无损压缩之间找到了折衷点,即“视觉无失真”^[1],使得图象质量在视觉上没有感觉失真的情况下压缩比达到 15:1 ~ 20:1。但在国内目前尚无明确地对“视觉无失真”作出评价标准的情况下,只能以压缩比作为代价,保守地采用无损压缩。ACR - NEMA 于 1992 年提出的 DICOM3.0 标准,已经包含了影像的无损压缩,1995 年又补充了关于“视觉无失真”压缩的规定。但是目前在政府尚未作出法律上的严格说明前,实际应用系统中仍然应

该采用无损压缩为妥。

图象数据压缩有利于存储与传输,考虑到法律问题,医生宁愿在图象质量没有受到损害的情况下作出诊断。现在通用的无损编码有 Huffman、LZW、算术编码、DPCM 编码等,压缩比是有限的,并且是针对帧内图象压缩。对图象序列的压缩可以看成是三维数据的压缩,除了考虑到图象在空间上的冗余度之外,还必须兼顾在时间域上的冗余度。MPEG^[2]方法尽管是针对序列图象的有损压缩,但其所包含的帧间与帧内压缩方法,均被证明是行之有效的。

本文提出的无损压缩算法就是充分利用了其中关于预测的方法和理论。在 DPCM 编码^[3]的基础上分析了 DSA(Digital Subtraction Angiography)图象序列内在的特性,提出了利用高阶差分(采用二阶,就是 D^2 PCM)图象信息,有效地减少了图象的冗余信息。该方法压缩比优于目前一些方法,同时在计算的稳定性和复杂度上都是可以接受的。

1 信号模型与特性

日益受到医生重视的介入治疗方法需要的是高分辨率和高信噪比的数字减影(DSA)图象^[4]。一个典型的 DSA 图象序列是:分辨率为 $1024 \times 1024 \times$

* 国家“863 计划”(No. 863-306-06-06)资助。

收稿日期:1998-05-19;收到修改稿日期:1998-06-16

10bit;实时采集5~8秒(每秒25~30帧)。图象数据总量可达180M~320M或更高。一个DSA图象序列可以表达成如图1,具体为:蒙片M,在造影前成象,一般为幅或者几幅。叠片L(n)(n=0,⋯, N-1),造影后成象,N为序列中图象的数目。减影图S(n)=L(n)-M,(n=0,⋯, N-1)。减影差异图SD(n)=S(n)-S(n-1),(n=1,⋯, N-1)。

整个序列可以由三种方式等价表达:(1)M和L(n)。(2)M和S(n)。(3)M、S(0)和SD(n)。

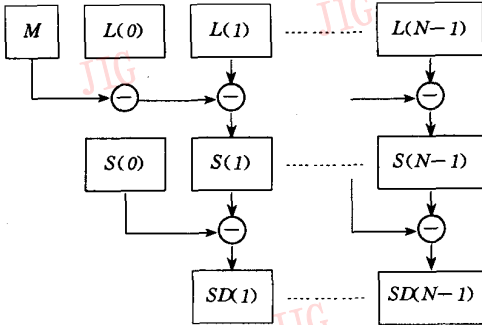


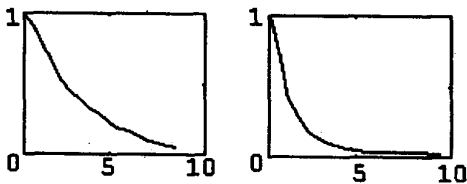
图1 DSA图象序列模型

一个典型的 DSA 图象序列,计算它们的熵值:
 $H(x) = - \sum_j p_j \log p_j$, (p_j 为 j 出现的概率)。可以得到

表1 典型 DSA 图象的熵值表

图象	熵值
M	6.65
L(n)	6.61
S(n)	4.68
SD(n)	3.67

序列中图象之间的相关性定义为: $R(k) = E\{I(n) \cdot I(n+k)\}$ 。分别计算减影图S(n)和减影差异图SD(n)之间的相关性,得到如图2中的曲线



a) S(n)的R(k)曲线 (b) SD(n)的R(k)曲线
 图2 减影图象和减影差异的图象相关性曲线

通过曲线可以看出 DSA 图象序列存在如下特性:(1) $k < 5$ 时,减影图S(n)之间存在着非常强的

相似形。(2)减影差异图SD(n)之间相似形迅速减弱,但k=1较为特殊,相关程度仍然可以达到0.60。这点在压缩中非常重要。

2 压缩框架

2.1 DPCM 编码

差分脉冲编码调制(Differential Pulse Code Modulation)方法充分利用了图象中相邻象素间较高的相似性。通用的DPCM编码可以通过图3来表示。图象中某个象素可以通过一定邻域内其它象素的线性组合来预测,以下式表示:

$$X_e = \sum_{(i,j) \in R} \alpha(m,n) X_r(i-m,j-n)$$

(X_e 是预测值, R 为邻域, $\alpha(m,n)$ 为预测系数)

编码器传输的是预测误差: $e(i,j) = X(i,j) - X_e(i,j)$,解码器通过下式进行解码

$$X_r = X_e(i,j) + e_q(i,j)$$

DPCM 编码为了保持无失真,必须是没有误差量化器,而只有预测器。这构成了“预测器+熵编码”保持型DPCM。文献[5]给出了最佳线性预测器的设计方法。

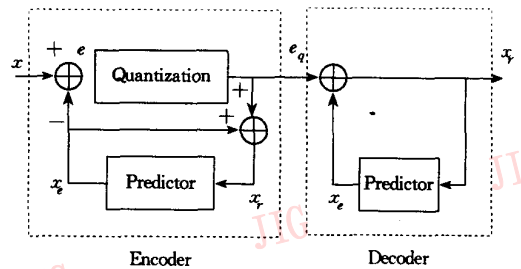


图3 DPCM编解码框图

2.2 D'PCM 编码

图象序列可以由三种等价方式表示,如果采用第一种方式表示图象序列,编码过程将没有利用图象间的信息相关,帧间的冗余度没有尽量利用;采用第二种方式,编码过程可以等价于采用空间DPCM编码,已经考虑了帧间的相关性,但是只利用了一阶差分信息。本文采用了第三种方式中的数据进行压缩处理。其原因如下:(1)在第三种方式中,图象的平均熵值较小,从理论上讲,进行无失真压缩所能达到的基本极限也较前两种方式低。因而针对第三种表达方式,可期望的压缩效果也会理想。(2)一般

信号进行一阶差分处理后,信号的相关程度明显降低,再进行二阶差分已经没有意义了。但对于 DSA 图象,一个显著的特点就是其一阶差分信号相关性仍较强,并且二阶差分也具有一定的意义。充分利用其二阶差分信号中出现的相关性,可以改善压缩性能,提高压缩比。

D²PCM 不同于二维或三维 DPCM 编码^[6],对于第二种方式中的 $S(n)$,对于每个像素 $S(n, i, j)$,如果逐点在序列时间轴上(n 为变量)采用 DPCM 编码,可以看出 DPCM 编码在三维上的推广。对于第三种方式中的 $SD(n, i, j)$,采取同样的编码,就构成了二阶差分脉冲编码(D²PCM)。

具体压缩过程如下:

- (1) 对于蒙片图象 M ,采用 RICE 编码压缩^[7]。
- (2) 构造预测器。采用 ARMR 型预测器,方程

为:

$$X_r(i, j, n) = \alpha(0,1)X_r(i, j-1, n-1) + \alpha(1,0)X_r(i-1, j, n-1) + \alpha(1,1)X_r(i-1, j-1, n-1) + b(X - X_e)$$

其中最后一项已经利用了图象的二阶差分信息。

(3) 信号输入 $S(n)$,以 n 为变量,进行线性预测。

(4) 对于输出的误差信号 $e_p(n, x, y)$ 进行熵编码(自适应算术编码)。

所以压缩过程可以由图 4 表示。

解压缩步骤亦如图 4 所示。

在压缩过程中,差值的正负极性将附加一个 Bit 信息。而有效减少这一位带来的影响可以采用 Bostelmann 在文献[3]中提出的反射型 DPCM 编码方法。

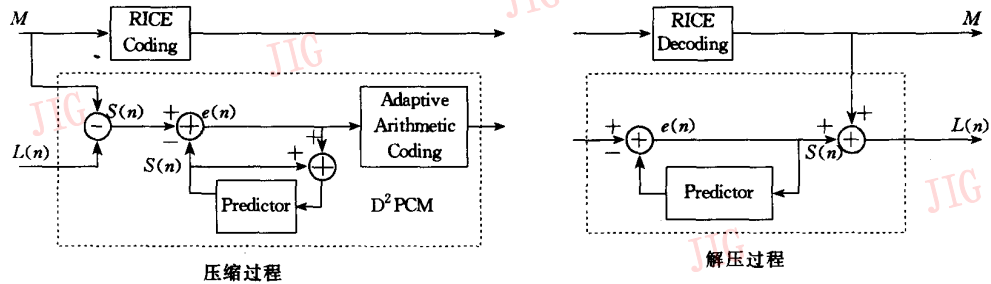


图 4 D²PCM 压缩算法框图

3 实验结果

采用本所研制的 DSA 设备在第四军医大学获得的图象数据。一般选取 $N = 128$,图象采集速度为 25 帧/秒,图象分辨率为 $1024 \times 1024 \times 10\text{bit}$ 。图 5 给出了其中的图象。

压缩结果为:

平均压缩后图象大小 503KB。

平均压缩比 $cr = \frac{1024 \times 1024 \times 10}{503316 \times 8} = 2.60 : 1$

平均比特率 $B = \frac{503316 \times 8}{1024 \times 1024} = 3.84 \text{ bit/pel}$

平均压缩效率 $\eta = \frac{H(x)}{B} = \frac{3.67}{3.84} = 95\%$

如果采用 DPCM 编码方式进行压缩,则相应的压缩结果分别为:

图象大小为 853KB, $cr = 1.53:1$,

$B = 6.53\text{bit/pel}$, $\eta = 72\%$ 。

可以看出采用二阶差分的编码压缩效率明显强于一阶差分。

采用自适应 Huffman、自适应算术编码同样对图象序列压缩(由于没有利用帧间相关性,该过程等价于每幅图象独立压缩)。得到相应的压缩结果见表 2。

表 2 压缩性能对比

	Huffman 编码	自适应算术编码	DPCM	本文方法
cr	1.36:1	1.47:1	1.53:1	2.60:1
B	7.35	6.80	6.53	3.84

可以看出本文提出的无损压缩性能优于前三种编码。

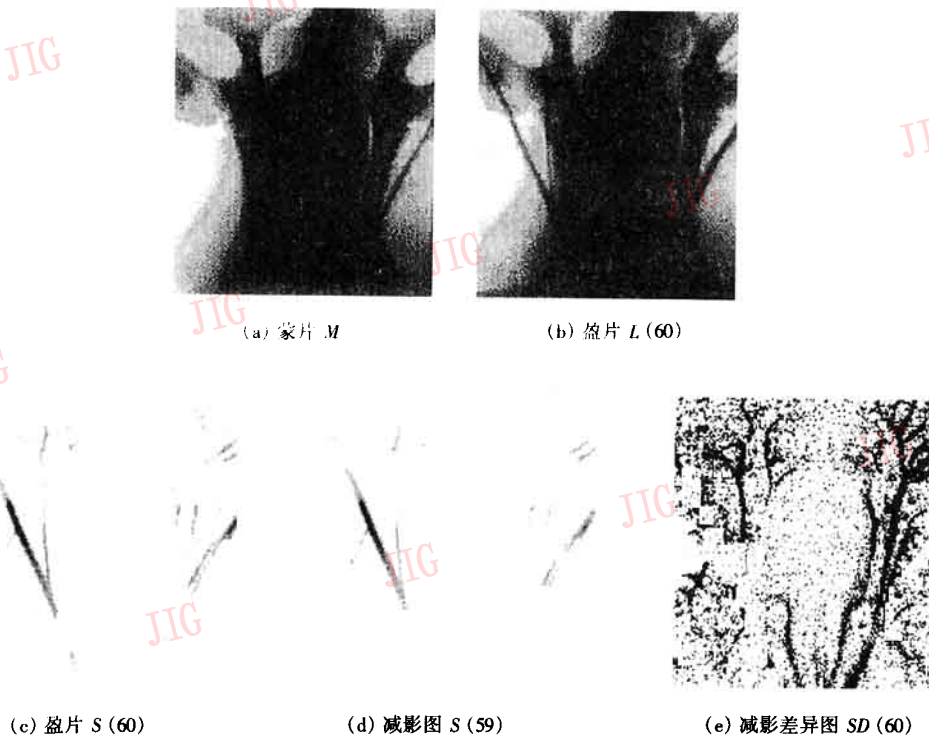


图5 DSA 图象

4 结 论

对于 DSA 图象序列进行压缩,除了需要去除图象在帧内空间上的相关性,必须更为注重考虑帧间对应象素间的相关性。特别是在其减影图象(一阶差分)之间仍然存在一定的相关性,就可以进一步推广 DPCM 编码方式到高阶形式,本文采用阶数为 2 即 D^2 PCM。该编码方式可以较有效地改善压缩效率。

但本文提出的无损压缩方法,也存在一些需要进一步研究改善的问题。(1) 图象的抗噪声能力需要增强。实验图象数据是在 DSA 设备选择了递归滤波(见附录 A) 的情况下获得的,该递归滤波方法可以较大地提高图象的信噪比。本文方法在低信噪比图象上的压缩效果不是非常理想。(2) 由于压缩过程对图象进行多次算术运算,计算量较大。加入并行快速算法,可以加快压缩速度。(3) 图象中物体的运动会导致减影图象中出现伪影(artifact),本文算法的压缩效率将随伪影的加剧而下降。因而在编码过程中需要引入自适应运动估计,可进一步改善压缩性能。以上这些问题正在研究中。

参 考 文 献

- 1 何任杰等. 医学图象压缩的现状与发展方向. 国外医学生物医学工程分册. 1996. 19(6):318~324.
- 2 MPEG(ISO/IEC JTC1/SC29/WG11). Coding of Moving Pictures and Associated Audio for Digital Storage Media at up to 1.5Mbit/s ISO. CD 11172, Nov, 1991.
- 3 Bostelmann G. A simple high quality DPCM-Code for video telephony using 8 Mbit per second. 1974. NTZ. 27(3):115~117.
- 4 吕维雪. 医学图象处理. 北京:高等教育出版社. 1989:140~169.
- 5 吴乐南. 数据压缩的原理与应用. 北京:电子工业出版社. 1995:116~120.
- 6 Roos P, Viegaver M A. Reversible 3-D decorrelation of medical images. IEEE. Medical Imaging, 1993, 12(3): 413~420.
- 7 Yeh D, Miller W H. The development of lossless data compression technology for remote sensing application, ICRASS' 94:307~309.

附录 A

递归滤波利用相邻图象的相关性叠加平均去除高斯型噪声,该方法对 X 线图象噪声有较好的去除效果。普通型递归滤波和变系数型递归滤波公式分别如下:

$$g_n(x, y) = f_n(x, y) + \alpha \cdot (g_{n-1}(x, y) - f_n(x, y))$$

$$g_n(x, y) = f_n(x, y) + T(q(M(x, y) \otimes (g_{n-1}(x, y) - f_n(x, y))))$$

其中 $g_n(x, y)$ 、 $f_n(x, y)$ 分别为递归处理后图象和当

前输入图象。 $M(x, y)$ 为运动检测模板, $q(r)$ 和 $T(r)$ 分别为运动系数量化函数和运动量化系数到递归函数映射函数。



纪震 1994年毕业于西安交通大学信息工程专业,获学士学位。1994年进入西安交通大学图象处理与识别研究所攻读博士学位。主要研究方向为医学影像处理和图象压缩。已经发表论文十数篇,并且参加了两项国家“863计划”项目的研究工作。



牟轩沁 副教授,1987年毕业于西安交通大学图象处理与识别研究所,获硕士学位。主要研究方向为图象采集设备的开发、大型医学影像设备的研制以及图象处理理论。目前负责国家“863计划”项目的研究工作。



蔡元龙 教授,博士生导师,西安交通大学图象所的创始人。长期从事图象处理与模式识别理论的研究工作,目前主要研究兴趣是计算机视觉理论和医学影像处理。



蒋大宗 教授,博士生导师。现为IEEE的Fellow,国际生物医学工程协会的亚太理事。长期从事生物医学工程领域的研究工作。目前主要研究兴趣是医学影像处理。

Lossless Compression of DSA Image Sequence Based on D²PCM Coder

Ji Zhen, Mou Xuanqin, Cai Yuanlong

(Image Processing Center, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049)

Jiang Dazhong

(Biomedical Engineering Institute, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049)

Abstract DPCM is a lossless compression method used widely. A novel D²PCM compression technique has been developed in this paper for more effective lossless compression of DSA (Digital Subtraction Angiography) image sequence, in which the correlation between subtraction images remains meaningful. By applying the lossless DPCM coder to the subtraction image, it constitutes a two-order differential coding scheme in spatial and temporal space. This proposed method is able to sufficiently reduce the temporal-spatial correlation. The high lossless compression ratio achieved by this technique will favor the transmission speed and storage space. The results in real applications prove it practicable and robust.

Key words DPCM, D²PCM, DSA, Image sequence, Lossless compression