文章编号:1001 - 9081(2006)07 - 1573 - 04

基于整数小波变换的零树编码的多位平面并行算法

钟萃相[1],韩国强[1],黄明和[2]
(1. 华南理工大学 计算机科学与工程学院,广东 广州 510640; 2. 江西师范大学 软件学院,江西 南昌 330027)
(cuixiang_zhong@ sohu. com)

摘　要:为了解决整数小波变换与传统零树编码(EZW)算法相结合产生的量化阈值的选取问题,有人提出了基于整数平方量化阈值的零树编码(ISZW)算法。但是,由于 ISZW 使用连续的整数平方作为量化阈值,缩短了相邻阈值间的距离,却增加了编码的次数,降低了编码速度。为此设计了基于整数小波变换的零树编码的多位平面并行算法,其中每个位平面的编码仅需对位平面进行一遍扫描,大大提高了 ISZW 的编码速度。

关键词:整数小波变换;零树编码;量化阈值;多位平面并行

中图分类号: TP391.41　　**文献标识码**:A

Multi-bit-plane parallel algorithm for integer square zerotree wavelet coding

ZHONG Cui-xiang[1], HAN Guo-qiang[1], HUANG Ming-he[2]
(1. *School of Computer Science and Engineering, South China University of Technology, Guangzhou Guangdong* 510640, *China*;
2. *Software College, Jiangxi Normal University, Nanchang Jiangxi* 330027, *China*)

Abstract: In order to solve the threshold-choosing problem caused by combining integer wavelet transform with traditional Embedded Zerotree Wavelet coding(EZW), Integer Square Zerotree Wavelet coding (ISZW) algorithm was proposed. Since ISZW used successive integer squares as quantization thresholds, it shortened the distance between two consecutive thresholds, but increased coding times, thus reduced coding speed. To solve this problem, a parallel multi-bit-plane coding algorithms for ISZW was presented, which required scanning each bit-plane only once, so greatly improved the coding speed of ISZW.

Key words: integer wavelet transform; Embedded Zerotree Wavelet coding(EZW); quantization threshold; parallel multi-bit-plane coding

0　引言

小波图像编码算法能够提供诸如多分辨率、多质量控制、嵌入式码流等优越性能,较好地适应以 Internet 为代表的新的传输媒体对图像浏览和传输提出的新要求。然而,这种小波变换具有如下缺点:1)利用一般的小波滤波器变换得到的结果都是浮点数,而量化要求是整数形式,这样必然引起失真,不利于实现无损压缩; 2)变换后系数是浮点数,运算速度不如整数运算速度快; 3)变换需要利用较多的存储器。于是 1994 年 Sweldens 提出了一种新的小波构造方法——第二代小波构造方法[1],它利用提升体制来实现整数小波变换。这种小波变换的优点在于:1)继承了传统的多分辨率分析的优点; 2)不依赖于傅里叶变换,能保证重构、简单可靠; 3)可实现整数到整数的小波变换; 4)变换后的系数是整数,运算速度快; 5)计算时能最小限度地利用存储器; 6)能够非常简单、快速而直接地实现逆变换; 7)边界处理很容易,能够很好地实现信号的重构; 8)它提供了一种快速实现方法,和标准的 Mallat 算法相比,运算量减少一半。因此整数小波变换已被新一代图像压缩标准 JPEG2000 所采用,并获得广泛的研究和应用[2~11]。

零树编码(Embedded Zerotree Wavelet coding, EZW)是当今最常用的编码技术之一,将整数小波变换与传统零树编码有机结合,不仅可以发挥整数小波变换的优点,还能大幅度提高图像的压缩效率[2,4,9~11]。EZW 的高效性在于利用了小波图像中各级子带间的相似性、小波系数的分布特性和幅度变化特点。若采用基于提升的整数小波对图像进行变换,将使变换后各子带系数幅值的动态变化范围降低,若继续使用传统 EZW 算法的由高到低排列的“2 的整数次幂”作为量化阈值,则会使整数小波中幅值接近的系数大量集中在同一重要图中,减少了零树的数量,不利于提高编码效率。为了解决上述问题,有人提出了基于整数平方量化阈值的零树编码(Integer Square Zerotree Wavelet coding, ISZW)算法[11]。该算法的基本思想是将 EZW 中的“2 的整数次幂”量化阈值改为“从 1 开始的整数平方量化阈值”,缩短阈值间的距离,使阈值间的重要系数分布更适合整数小波变换中的小波系数的分布特点,解决了整数小波变换零树编码的低效问题,同时不增加编码算法的复杂度。

然而,由于 ISZW 使用连续的整数平方作为量化阈值,缩短了阈值间的距离,从而增加了编码的次数。而编码次数太多会增加编码的时间复杂度,也会影响解码图像的视觉效果,难以满足图像实时处理的需要。为此作者仿效某些设计多位平面并行的 EZW 编码算法的作者[12],设计了一个基于整数小波变换的零树编码的多位平面并行算法,但每个位平面的编码仅需一遍扫描即可完成,比其他作者的多位平面并行的

收稿日期:2006 - 01 - 05
基金项目:国家自然科学基金项目(10171033);广东省自然科学重点基金项目(05103541, 31340);江西省自然科学基金项目(991810)
作者简介:钟萃相(1965 -),男,江西崇义人,博士研究生,主要研究方向:多媒体技术;　韩国强(1963 -),男,江西抚州人,教授,博士生导师,主要研究方向:多媒体技术;　黄明和(1955 -),男,江西南昌人,教授,硕士,主要研究方向:算法、并行处理.

EZW 编码算法所要求的两到三遍扫描次数还少,从而大大提高了 ISZW 的编码速度。

1 传统的零树编码算法

传统的零树编码算法包含下列基本步骤[6~7]:

1)图像的小波分解

对图像进行 K 层小波分解之后,图像的小波系数矩阵可分成 K 层,第 $l(1 \leq l \leq K)$ 层包含 3 个细节子带 HL_l, LH_l 和 HH_l,特别地,第 K 层还包含最低频子带 LL_K。小波系数矩阵还可分成多个树形结构,每个树形结构以最低频子带中的一个系数为根,并且在同一方向的不同子带中有儿子系数。因为 LL_k 中有 $2^{-2K}N^2$ 个系数,所以共有 $2^{-2K}N^2$ 个树。一个树的根有 3 个直属儿子,它们分别位于 HL_K, LH_K 和 HH_K 子带中的同一个位置。对于其中的任一个子系数或其后代系数,若它在分解矩阵中的位置是 (i, j),则它在同一方向的分辨率更高一层的子带中有 4 个儿子系数位于 $\{(2i+m, 2j+n) \mid 0 \leq m, n < 1\}$[1, 4~5, 8~10, 12]。相反地,给定层 1 到层 $K-1$ 的任意一个系数位置 (r, s),也可确定其父系数的位置为 $(r/2, s/2)$;对于层 K 的任意一个系数位置 (r,s),也可确定其父系数的位置为 $(r - [orient/2] * N2^{-K}, s - (orient \bmod 2) * N2^{-K})$ ($orient$ 为子带方向数,对应 HL_K, LH_K, HH_K 的方向数分别为 1,2,3)。

2)选择阈值

求小波系数矩阵中的最大绝对值系数 $C = \max\limits_{1 \leq i, j \leq N} \{|c_{i,j}|\}$,并令 $e = [\log_2 C]$,则选择初始阈值为 $T_0 = 2^e$,第 i 次编码扫描使用的阈值为 $T_i = T_{i-1}/2$ $(1 \leq i \leq e+1)$。

3)主扫描

EZW 的编码共需 $(e+1)$ 次主扫描。第 i 次主扫描将小波系数与阈值 T_{i-1} 进行比较,绝对值不小于阈值的系数称为有效系数,否则称为无效系数。主扫描输出如下几种符号类型:POS,正有效系数;NEG,负有效系数;ZTR,一个零树的根,但其父系数不是零树的根;IZ,本身是无效系数,但至少有一个有效的后代系数;ZERO,零树上的一个系数,但不是零树的根。

在扫描过程中,用一个主表(或称有效值映射表)来记录这些符号和有效系数值。每次主扫描结束后,将有效系数置为 0,以免下次主扫描又对它们编码。

详细而言,主扫描一般由以下三个阶段组成:

1)第一遍扫描系数矩阵,按"之"字顺序逐个检查小波系数,以区分有效系数与无效系数,并为无效系数标记有效子孙的存在性;

2)第二遍扫描系数矩阵,利用第一遍扫描所积累的信息,对无效系数进一步区分"ZTR"和"IZ";

3)第三遍扫描系数矩阵,把标识为"POS","NEG","ZTR"或"IZ"的系数分别映射为符号"P","N","T"或"Z",并把这些符号存于主表中;同时把标识为"POS","NEG"的有效系数值也记录到主表中,而在系数矩阵中用 0 代替它们。

由于每次主扫描过程需要对小波系数矩阵进行 3 遍扫描,整个编码过程又需要对小波系数矩阵进行 $e+1$ 次主扫描,因此共需 $3(e+1)$ 遍扫描,大大降低了编码的速度。

4)辅扫描,对主扫描产生的主表中的有效系数进行量化,并用辅表来记录量化符号。

5)输出编码信息。

把包括阈值、主表和辅表在内的编码信息传输给解码器。

从 EZW 的基本步骤可知,该算法的高效性建立在小波系数分布特性和幅值变化特点的基础上,若小波变换的形式发生了变化而导致小波系数分布和幅值均发生较大变化,就应该调整量化阈值的选取方案,以便在不增加编码复杂度的情况下提高编码效率。

2 基于整数平方量化阈值的零树编码算法

ISZW 的基本思想是:用"从 1 开始的正整数平方"取代传统嵌入零树编码中所用的"2 的整数次幂"作为编码过程中的量化阈值,相对降低了相邻阈值区间的距离,对于小波变换后各子带系数而言,除了最低量化阈值区间以外,每个量化阈值区间内的重要系数个数随着量化阈值的降低近似线性增加。该算法可以最大限度地增加编码过程中的零树数量,大大提高了编码效率[6,11]。

基于整数平方量化阈值的小波零树编码算法的具体步骤如下:

1) 建立数组 $s(k)$,令 $s(k) = k^2 (k = 0,1,2,\cdots)$,数组中的数值即为各级量化阈值,找出所有子带中绝对值最大的像素幅值 $f_{\max}$,将其与 $s(k)$ 作比较,如果 $f_{\max} > s(k)$,则 $k = k+1$,依次循环,直到 $f_{\max} < s(k)$,此时令 $s(k-1)$ 为最大量化阈值。

2) 规定和 EZW 算法同样的扫描顺序。

3) 在新阈值下按扫描顺序和 EZW 编码中相邻父子子带系数的相关性,生成重要系数图和零树根。

4) 完成同一阈值下的编码后重复步骤 2),直至量化阈值为 1。

3 基于 ISZW 的多位平面并行算法

3.1 算法的基本思想

仔细分析 ISZW 编码的层次结构,我们可以发现编码是分 $e(=\lfloor \sqrt{f_{\max}} \rfloor)$ 个层次串行进行,第 $l(1 \leq l \leq e)$ 层的编码只需跳过大于等于 $(e-l+2)^2$ 的系数,仅对小于 $(e-l+2)^2$ 的系数进行编码。因此可容易地分离开位平面之间的关联,而实现位平面编码的并行操作。而且在每个位平面的编码过程中,仅需参考当前系数的父系数或直系子系数的类型来确定当前系数的类型,从而可把 ISZW 主扫描的前两遍扫描合而为一;另外,可根据当前系数的行列坐标计算出它在第三遍扫描中输出到主表的顺序位置,从而可在第一遍扫描过程中完成一个系数的类型确定之后,直接把它输出到对应本位平面的主表 D 中。因此,仅需对小波系数矩阵进行一遍扫描,即可完成对一个位平面的编码。

假定使用基于分布式存储机群系统和消息传递体系结构的超级服务器系统来进行图像编码。为了实现位平面编码的并行处理,各处理机需要设置如下一些中间数据结构:1)用于暂存图像小波系数矩阵的二维数组 W; 2) 存放本次位平面编码中零树结构上的系数类型及其有效儿孙标记的三维数组 $S = (s_{i,j,k})(1 \leq i, j \leq N, 1 \leq k \leq 2)$; 3) 位平面编码产生的一个主表 $D(N^2)$。

3.2 算法描述

Input: 图像的 K 层整数小波变换系数矩阵 $W = (c_{i,j})$ $(1 \leq i, j \leq N)$ ($N \times N$ 为图像的大小,$N = 2^n$, $K \leq n$)

Output: e 个位平面的编码主表 $D(N^2)$,其中 $e = \lfloor \sqrt{f_{\max}} \rfloor$。

Begin

for all P_m, where $1 \leq m \leq e$ do

接收服务器发来的图像小波变换矩阵;

for $l \leftarrow 1$ to K do

/* 循环迭代处理第 1 个到第 K 个分辨率层 */

for $orient \leftarrow 1$ to 3 do

/* HL_l, LH_l, HH_l的子带方向数分别为 1,2,3 */

begin

/* 第l层的每个方向子带有$2^{-l}N \times 2^{-l}N$个系数,按$2^{-l}N$行和$2^{-l}N$列的形式处理每个系数 */

for $x \leftarrow 1$ to $2^{-l}N$ do

for $y \leftarrow 1$ to $2^{-l}N$ do

按下列公式计算当前系数的行列坐标(i, j)及其父系数的行列坐标(pi, pj):

$i = x + 2^{-l}N \times [orient/2]$,

$j = y + 2^{-l}N \times (orient - 2 \times [orient/2])$;

当$1 \leqslant l < K$时, $pi = 1 + [(i-1)/2]$,

$pj = 1 + [(j-1)/2]$;

当$l = K$时, $pi = x$, $pj = y$

计算当前系数在主表 D 中的对应位置:

$index = orient \times 2^{-2l}N^2 + (i - 1 - 2^{-l}N \times [orient/2]) \times 2^{-l}N + (j - 2^{-l}N \times (orient - 2 \times [orient/2]))$

为确定当前系数所属的阈值区间,计算当前系数的绝对值的平方根的取整值:$z = \lfloor \sqrt{|c_{i,j}|} \rfloor$

为确定当前系数的父系数$c_{pi,pj}$所属的阈值区间,计算父系数的绝对值的平方根的取整值:$y = \lfloor \sqrt{|c_{pi,pj}|} \rfloor$

若$z = m$则

若当前系数$c_{i,j}$为正,则$c_{i,j}$相对于阈值区间$[m^2, (m+1)^2)$为正有效系数,故置

$s_{i,j,1} \leftarrow 1$; D($index$). kind = ‘P’;

若当前系数$c_{i,j}$为负,则$c_{i,j}$相对于阈值区间$[m^2, (m+1)^2)$为负有效系数,故置

$s_{i,j,1} \leftarrow 2$; D($index$). kind = ‘N’;

在主表 D 中的对应位置记录有效值$c_{i,j}$:

D($index$). value = $c_{i,j}$;

$c_{i,j}$的父系数$c_{pi,pj}$有相对于阈值区间$[m^2, (m+1)^2)$的有效儿孙系数, 故置

$s_{pi,pj,2} \leftarrow 1$

若当前系数处于第二层以上,则还需处理它的四个直系子系数的类型

先计算出每个子系数的坐标rs, cs;

若某个子系数$c_{rs,cs}$相对于阈值区间$[m^2, (m+1)^2)$为‘ZERO’类型($S_{rs,cs,1} = 0$),则先计算该子系数在主表 D 中的对应位置:

$ind = orient \times 2^{2-2l}N^2 + (rs - 1 - 2^{1-l}N \times [orient/2]) \times 2^{1-l}N + (cs - 2^{1-l}N \times (orient - 2 \times [orient/2]))$

若当前系数处于第二层则该子系数处于第一层,因而是孤零类型, 故置

$s_{rs,cs,1} \leftarrow 4$; D($index$). kind = ‘Z’;

否则, 若当前系数处于第三层则该子系数属于零树根, 故置

$s_{rs,cs,1} \leftarrow 3$; D($index$). kind = ‘T’;

若$z < m$则

若当前系数处于第一层且其父系数为有效系数($y \geqslant m$),则当前系数为孤零, 故置

$s_{i,j,1} \leftarrow 4$; D($index$). kind = ‘Z’;

若当前系数处于第一层且其父系数为无效系数($y < m$),则当前系数为‘ZERO’, 故置

$s_{i,j,1} \leftarrow 0$; D($index$). kind = ‘ZERO’;

若当前系数处于第二层以上且有有效儿孙($S_{i,j,2} = 1$),则其父系数也有有效儿孙且当前系数为孤零, 故置

$s_{rp,cp,2} \leftarrow 1$; $s_{i,j,1} \leftarrow 4$; D($index$). kind = ‘Z’;

还需处理它的四个直系子系数的类型:

先计算出每个子系数的坐标rs, cs;

若某个子系数$c_{rs,cs}$相对于阈值区间$[m^2, (m+1)^2)$,为‘ZERO’类型($S_{rs,cs,1} = 0$),则先计算当前系数在主表 D 中的对应位置:

$ind = orient \times 2^{2-2l}N^2 + (rs - 1 - 2^{1-l}N \times [orient/2]) \times 2^{1-l}N + (cs - 2^{1-l}N \times (orient - 2 \times [orient/2]))$

若当前系数处于第二层则该子系数处于第一层, 因而是孤零类型, 故置

$s_{rs,cs,1} \leftarrow 4$; D(ind). kind = ‘Z’;

否则, 若当前系数处于第三层则该子系数属于零树根, 故置

$s_{rs,cs,1} \leftarrow 3$; D(ind). kind = ‘T’;

若当前系数处于第二层以上但无有效儿孙($S_{i,j,2} = 0$),则

若其父系数为有效系数($y \geqslant m$)则当前系数为零树根, 故置

$s_{i,j,1} \leftarrow 3$; D($index$). kind = ‘T’;

若其父系数为无效系数($y < m$)则当前系数为‘ZERO’类型, 故置

$s_{i,j,1} \leftarrow 0$; D($index$). kind = ‘ZERO’;

/* 按$2^{-K}N$行和$2^{-K}N$列的形式处理最低频子带LL_K的系数 */

for $i \leftarrow 1$ to $2^{-K}N$ do

for $j \leftarrow 1$ to $2^{-K}N$ do

计算当前系数在主表 D 中的对应位置:

$index = (i-1) \times 2^{-K}N + j$;

为确定当前系数所属的阈值区间,计算当前系数的绝对值的平方根的取整值:$z = \lfloor \sqrt{|c_{i,j}|} \rfloor$

若$z = m$则

若当前系数$c_{i,j}$为正,则$c_{i,j}$相对于阈值区间$[m^2, (m+1)^2)$为正有效系数,故置

$s_{i,j,1} \leftarrow 1$; D($index$). kind = ‘P’;

若当前系数$c_{i,j}$为负,则$c_{i,j}$相对于阈值区间$[m^2, (m+1)^2)$为负有效系数,故置

$s_{i,j,1} \leftarrow 2$; D($index$). kind = ‘N’;

在主表 D 中的对应位置记录有效值$c_{i,j}$:

D($index$). value = $c_{i,j}$;

还需处理它的三个直系子系数的类型;

先计算出每个子系数的坐标rs, cs;

若某个子系数$c_{rs,cs}$相对于阈值区间$[m^2, (m+1)^2)$,为‘ZERO’类型($S_{rs,cs,1} = 0$),则先计算当前系数在主表D中的对应位置:

$ind = orient \times 2^{-2K}N^2 + (rs - 1 - 2^{-K}N \times [orient/2])$

$\times 2^{-K}N + (cs - 2^{-K}N \times (orient - 2 \times [orient/2]))$

若分解层数 $K > 1$ 则该子系数属于零树根，故置

$s_{rs,cs,1} \leftarrow 3$；D(ind). kind = ‘T’；

否则，该子系数是孤零类型，故置

$s_{rs,cs,1} \leftarrow 4$；D(ind). kind = ‘Z’；

若 $z < m$ 则

若当前系数有有效儿孙($S_{row,col,2} = 1$)，则它为孤零，故置

$s_{i,j,1} \leftarrow 4$；D($index$). kind = ‘Z’；

还需处理它的三个直系子系数的类型：

先计算出每个子系数的坐标 rs, cs；

若某个子系数 $c_{rs,cs}$ 相对于阈值区间 $[m^2, (m+1)^2)$ 为‘ZERO’类型($S_{rs,cs,1} = 0$)，则先计算当前系数在主表 D 中的对应位置：

$ind = orient \times 2^{-2K}N + (rs - 1 - 2^{-K}N \times [orient/2]) \times 2^{-K}N + (cs - 2^{-K}N \times (orient - 2 \times [orient/2]))$

若分解层数 $K > 1$ 则该子系数属于零树根，故置

$s_{rs,cs,1} \leftarrow 3$；D(ind). kind = ‘T’；

否则，该子系数是孤零类型，故置

$s_{rs,cs,1} \leftarrow 4$；D(ind). kind = ‘Z’；

若当前系数无有效儿孙($S_{i,j,2} = 0$)，则它为零树根，故置 $s_{i,j,1} \leftarrow 3$；D($index$). kind = ‘T’；

end

3.3 算法分析

上面的并行算法把每个位平面分配给一个处理机处理，由于巧妙地分离了位平面之间的关联，使这些位平面可被完全并行地编码，因此编码速度提高了 e 倍。另外，并行算法中每个位平面的编码仅需一遍扫描即可完成，而串行算法中每个位平面的编码需要三遍扫描，这样每个位平面的编码速度又提高了 3 倍。因此我们的并行算法使编码速度提高了大约 $3e$ 倍，比其他已有的位平面编码并行算法的速度还要快。

参考文献：

[1] 丁绪星，朱日宏，李建欣．基于整数小波变换和改进嵌入零树编码的图像压缩[J]．电子与信息学报，2004，26(7)：1064－1069.

[2] REICHEL J, MENEGAZ G, NADENAU MJ, *et al*. Integer wavelet transform for embedded lossy to lossless image compression[J]. IEEE Transaction on Image Processing, 2001, IP-10(3): 383－392.

[3] 姜会亮，胡学龙，郭振民．基于整数小波变换的静态图像压缩编码技术[J]．微计算机应用，2005，26(2)：221－224.

[4] 李萍，许录平．整数小波图像变换及统计分析[J]．计算机工程与应用，2004，40(11)：90－1107.

[5] SWELDENS W. The lifting scheme: A construction of second generation wavelets[J]. Journal Mathematical Analysis, 1997, 29(2): 511－546.

[6] 孙即祥．图像压缩与投影重建[M]．北京：科学出版社，2005.

[7] 孙延奎．小波分析及其应用[M]．北京：清华大学出版社，2005.

[8] 吴永宏，潘泉，张洪才，等．基于提升框架的整数小波变换[J]．电子与信息学报，2004，26(4)：659－662.

[9] 许超．多位平面并行的 EZW 零树编码电路研究[J]．计算机研究与发展，2004，41(3)：451－455.

[10] 薛文通，宋建社，袁礼海，等．基于整数到整数小波变换的图像编解码器设计[J]．系统工程与电子技术，2005，27(4)：615－618.

[11] 张剑．基于整型零树小波变换的编码研究与应用[J]．华中科技大学学报(自然科学版)，2004，32(12)：1－4.

[12] 张立保，王珂．一种基于整数小波变换的图像编码算法[J]．软件学报，2003，14(8)：1433－1438.

(上接第 1572 页)

反观基于局部结构张量的图像插值方法，以上这些问题在某种程度上可以避免。首先在计算局部结构张量时，根据需要可以采用 7×7 或者更大的邻域，而且对该邻域内各点的张量的方向和大小信息都作加权平均，这有利于更好地提取图像的边界信息；更重要的是，插值中考虑到了结构张量的各个不同通道所包含的梯度信息，从而可以更好地处理边界，得到更好的插值结果。

5 结语

本文中我们利用局部结构张量所描述的图像信息，提出了一种有效的二倍因子插值算法，它能够在较大程度上保留图像的边缘信息和其他集合特征，极大地减少了使用传统的线性插值方法，如双线性插值、双三次插值方法所产生的图像模糊和阶梯效应。实验结果也证实了我们的方法无论是在视觉上还是在量化指标上都优于传统的插值方法。而且本文的方法可以方便地应用到向量值和张量值图像数据。最后我们还讨论了基于结构张量的插值和基于 PDE 的插值方法之间的关系，并指出后者包含在本文算法的框架之下。

参考文献：

[1] BLU T, Thévenaz P, UNSER M. Linear interpolation revitalized[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2004, 13(5): 710－719.

[2] MORSE BS, SCHWARTZWALD D. Isophote - based interpolation [A]. IEEE Processing of ICIP[C], 1998. 227－231.

[3] LI X, ORCHARD MT. New edge-directed interpolation[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2001, 10(10): 1521－1527.

[4] LU X, HONG PS, SMITH MJ. An efficient directional image interpolation method[A]. Processing of IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal[C], 2003. 97－100.

[5] CARRATO S, TENZE L. A high quality of image interpolator[J]. IEEE Signal Processing Letters, 2000, 7(6): 132－134.

[6] JIANG H, MOLONEY C. A new direction adaptive scheme for image interpolation[A]. Processing of ICIP[C], 2002. 369－372.

[7] 谢美华，王正明．基于图像梯度信息的插值方法[J]．中国图象图形学报，2005，10(7)：856－861.

[8] KNUTSSON H. Representing local structure using tensors[A]. 6th Scandinavian Conference on Image Analysis[C]. Oulu, Finland, 1989. 244－251.

[9] CASTAO-MORAGA CA, RODRIGUEZ-FLORIDO MA, ALVAREZ L, *et al*. Anisotropic interpolation of DT-MRI[A]. BARILLOT C, HAYNOR DR, HELLIER P, ed. MICCAI[C]. Saint-Malo, France, 2004. 343－350.

[10] Hauβecker H, Jähne B. A tensor approach for local structure analysis in multi-dimensional images[A]. Proceedings 3D Image Analysis and Synthesis'96[C], 1996.

[11] Theuβl T, HAUSER H, Gröller E. Mastering windows: Improving reconstruction[A]. Proceedings of IEEE Volume Visualization[C], 2000. 101－108.