

文章编号 1004-924X(2006)03-0498-04

基于整型提升小波变换的图像处理及 DSP 实现

陈升来^{1,2}, 黄廉卿¹, 郭静寰³

- (1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033;
2. 中国科学院 研究生院, 北京 100039; 3. 大连海事大学 计算机科学与技术学院, 辽宁 大连 116026)

摘要:针对数字信号处理器(DSP)的并行特性,提出了一种二维整型提升小波的并行体系结构。该结构采用乒乓缓存策略,使得数据的传输和小波变换能够同时进行;用基于行的列变换方法使得列变换只需少量行变换结果就能进行列变换;用移位操作代替乘法操作,大大减少了算法的运算量。整个结构采用流水线设计,提高了硬件资源的利用率和降低了算法的中间存储量,实现了图像的实时小波变换。实验证明,该算法与原算法相比,速度提高了 15 倍,达到了每秒 85 帧;重构图像的峰值信噪比(PSNR)虽然比离散小波变换要低一些,但仍达到了 42 dB 以上,因此该算法具有广阔的应用前景。

关键词:DSP;提升小波;乒乓缓存;小波变换;图像处理

中图分类号:TP391.4 文献标识码:A

Image processing based on integral lifting scheme and its implementation by DSP

CHEN Sheng-lai^{1,2}, HUANG Lian-qing¹, GUO Jing-huan³

- (1. *Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;*
2. *Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China;*
3. *College of Computer Science & Technology, Dalian Maritime University, Dalian 116026, China*)

Abstract: Based on the parallel feature of Digital Signal Processor (DSP), the parallel architecture of 2-D integral lifting scheme was presented to perform simultaneously data transfer and wavelet transform with the strategy of ping-pong buffer. The column transform method based on line transform permits column transform in a few line transform results only; multiplication operations are substituted by shift operations to enhance the transform speed. The whole architecture is optimized in the pipelined design way to achieve higher hardware utilization and decrease the intermediate data quantity. The transform speed of optimized algorithm is 85 frame per second and 15 times faster than original algorithm's. The Peak Signal-to-noise Ratio (PSNR) of optimized algorithm is lower than original algorithm's, but it is over 42 dB, thereby optimized algorithm has high application value.

Key words: DSP; lifting scheme; ping-pong buffer; wavelet transfer; image processing

收稿日期:2005-10-15; 修订日期:2006-2-15.

1 引言

小波变换由于其良好的时频局域特性,在图像处理和压缩等领域得以广泛应用和发展。Sweldens 于 1995 年提出的提升小波变换技术^[1],可实现从整数到整数的小波变换^[2-5],它虽然摆脱了传统离散小波变换滤波器和傅里叶变换的概念,但仍需要大量运算,无法满足实时要求。

二维图像小波变换的一般处理方法是先对图像的行(列)进行变换,再存储行(列)处理的中间结果,然后进行列(行)变换,这需要存储大量的中间结果,增加了硬件的开销,降低了硬件的利用率,限制了芯片处理数据的速度。

TMS320C62X 是美国德州仪器公司(TI)推出的高性能定点数字信号处理器(DSP)^[6],它采用超长指令字(VLIW)结构,片内有 8 个并行处理的功能单元,分为相同的两组,8 个功能单元在一个周期内最多可以同时执行 8 条 32 位指令,提高了程序的执行速度。

根据 DSP 的并行特性,提出一种二维提升小波变换的并行结构。它利用乒乓结构,先将 DSP 片外内存中的一部分图像数据读取到片内内存,再对片内内存内的图像数据进行行变换,行变换后直接进行基于行的列变换,最后将小波系数存储到片外内存。图像数据的读取、存储和小波变换同时进行,这样降低了算法的中间存储量,提高了 DSP 的利用率,从而实现图像的实时小波变换。

2 整型提升小波变换

提升小波变换是一种不依靠傅里叶变换构造小波的方法^[7-8],它将传统小波变换分解为提升形式来实现,并对每一步提升所产生的浮点数进行取整,构造出可逆的整型小波变换。提升小波变换分为分裂、预测、更新三个步骤,如图 1 所示。

分裂:一般是将原始信号 s 分解为偶信号 s_{2j} 和奇信号 s_{2j+1} 。

预测:保持偶信号 s_{2j} 不变,通过内插细分的方法预测奇信号 s_{2j+1} ,预测值与实际的差值为 d_j ,即 $d_j = s_{2j+1} - P(s_{2j})$,其中 P 为预测算子。

更新:更新过程就是通过 d_j 来更新数据 s_{2j} ,

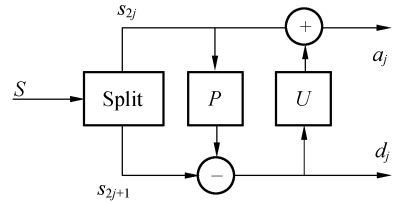


图 1 提升小波分析过程

Fig. 1 Analysis procedure of lifting scheme

以保持原始信号 s 的某种特性,如保持平均值不变,该操作记为 $a_j = s_{2j} + U(d_j)$,其中 U 为更新算子。

5/3 双正交小波的提升步骤如式 1 所示,提升系数(1/2 和 1/4)的乘法运算可以用移位操作来代替,便于实现定点算法,减少运算量。

$$\begin{cases} d_j = s_{2j+1} - \left[\frac{1}{2} (s_{2j} + s_{2j+2}) \right] \\ a_j = s_{2j} + \left[\frac{1}{4} (d_{j-1} + d_j) \right] \end{cases}, \quad (1)$$

3 二维提升小波的并行 DSP 结构

3.1 乒乓缓存结构

DSP 片内内存与片外内存的区别在于:片内内存速度快,但容量小,片外内存容量大,但 CPU 的访问速度太慢,其性能要差 10 倍以上^[6]。由于图像数据量大,不可能将所有的图像数据保存到片内内存中,这造成 DSP 多次读取片外内存,降低 DSP 处理速度,因此,需要设计一个能够并行处理的乒乓缓存结构来提升算法的运算速度。如图 2 所示,它首先在片内内存中分配两个数据缓存区:Buffer0 和 Buffer1,然后利用 DMA 将图像

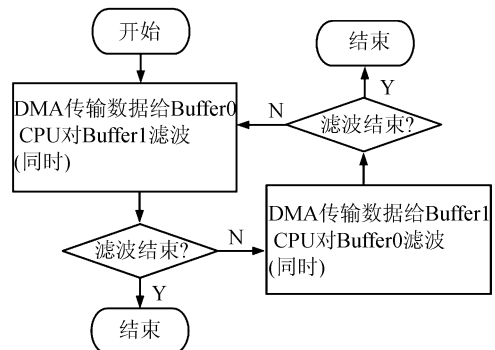


图 2 乒乓缓存结构

Fig. 2 Architecture of ping-pong buffer

数据依次传进两个缓存区。由于 DMA 的操作不占用 CPU 的时间,从而有效地降低了算法的处理时间。

3.2 二维提升小波体系结构

二维提升小波变换的体系结构如图 3 所示,它由三部分组成:行模块,列模块和缓存区,这里的缓存区指的是乒乓缓存结构中的 Buffer0 或 Buffer1。首先,存储在片外内存的图像数据通过 DMA 按行的顺序读进缓存区,然后行模块对缓存区内的图像数据进行行变换,并向缓存区回写低频信息和高频信息,当缓存区内所有行都已经完成行变换时再启动列模块进行列变换,最后 DMA 将列变换产生结果写入片外内存。

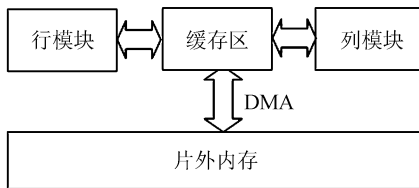


图 3 二维提升小波体系结构

Fig. 3 Architecture of two-dimensional lifting wavelet

列模块是一种基于行的列变换方式,它的变换公式如下:

$$\begin{cases} d_{j,k} = s_{2j+1,k} - \left[\frac{1}{2} (s_{2j,k} + s_{2j+2,k}) \right] \\ a_{j,k} = s_{2j,k} + \left[\frac{1}{4} (d_{j-1,k} + d_{j,k}) \right] \end{cases}, \quad (2)$$

其中 j 为缓存区内的行序号, k 为缓存区内的列序号。

列模块每次变换时,读取四行数据,其中三行为行变换结果,一行为列变换的高频信息;它按照式(2)从左到右按行的方向对这四行数据进行列变换,输出一行列低频信息和一行列高频信息。列模块这种工作方式只需四行数据就能进行列变换,使得缓存区内的数据能够在行变换后马上进行列变换,不必等待所有图像数据的行变换结果,极大减少了 DSP 对片外内存的读写次数,提高了提升变换的速度。

3.2.1 提升小波分裂步骤的实现

在提升过程中,分裂的目的是将高频信息和低频信息分开,便于下一级小波变换或信号处理。实现的方法有三种:(1)先用 DMA 将一行图像数据分裂为两个数据序列:奇序列和偶序列,再进行预测和更新;(2)直接对一行图像进行预测和更

新,但将结果写入新行中,写的时候将低频部分写入新行的低半行,高频部分写入新行的高半行;(3)对一行图像进行预测和更新,直接将结果写入原来的地址,然后用 DMA 将变换结果分裂。显然,第(1)、(3)种方法不仅需要额外的一行内存空间,还占用 DMA 资源,第(2)种方法只需一行额外的内存空间。在行模块中,可以直接采用第(2)种方法;在列模块中,由于需要 DMA 将变换结果写入片外内存,因此采用第(3)种方法,这样不仅可以节省内存,而且也不浪费 DMA 资源。

3.2.2 缓存失败问题

在列模块中,缓存区中的每一行列变换依赖于前一行和后一行,这在缓存区的边界产生缓存失败问题,即缓存区的第一行由于缺少前一行造成缓存失败和缓存区的最后一行由于缺少后一行造成缓存失败。实际上,由于 Buffer0 和 Buffer1 在地址上相邻,因此只有 Buffer0 的第一行和 Buffer1 的最后一行发生缓存失败。为了解决这个问题,可以在 Buffer1 列变换结束时,用 DMA 将 Buffer1 最后两行传输到 Buffer0 的头两行的地方,因此需要 Buffer0 保留头两行用于解决缓存失败问题。

4 实验结果

以 TMS320C6205 评估板(EVM)作为实验平台;该 EVM 板包括一个 TMS320C6205 DSP 芯片,频率可达 200 MHz,带有 64 K 字节的片内内存;片外扩展了 16 M 字节,频率为 100 MHz 的 SDRAM。实验中,选取两幅 512 × 512 的灰度图像 Lena 和 Barbara 作为实验对象,小波变换级数为 3,边界采用对称扩展,保证图像的完整重构。分别采用本文优化算法和原算法对两幅图像进行小波变换,从小波分析和重构两方面来比较这两种算法,实验结果如表 1 所示。

表 1 小波变换时间比较

Tab. 1 Comparison of wavelet transform time

图像	小波分析时间(ms)		小波重构时间(ms)	
	原算法	优化算法	原算法	优化算法
Lena	186.2	11.5	194.6	11.0
Barbara	186.1	11.6	194.7	11.1

从表 1 可以看出,优化算法跟原算法相比,速度提高了 15 倍,它的处理速度达到每秒 85 帧,满

足实时要求。

另外,实验还从重构图像的峰值信噪比(PSNR)方面与常规离散小波变换做了对比,实验结果如表2所示,图4显示了两种方案重构图像的人眼视觉效果。

表2 PSNR比较结果(dB)

Tab.2 Comparison of PSNR(dB)

图像	优化算法	离散小波变换
Lena	46.6	55.4
Barbara	42.7	54.5



(a) 原始图像
(a) Original image



(b) 优化算法
(b) Optimized algorithm



(c) 离散小波变换

(c) Discrete wavelet transform

4 Lena 图像经 DSP 小波分析后的重构图像视觉效果

Fig.4 Image quality after being DSP lifting Analysis

从表2可见,优化算法与离散小波变换相比,PSNR要低10dB左右,这是因为整型提升过程对小波系数的小数部分进行了舍去;但重构图像的PSNR达到了42dB以上,并不影响图像编码、去噪等应用领域;从图4的显示结果也可以看出,两种方案重构图像的视觉效果相当。

5 结 论

针对DSP的并行特性,提出一种二维提升小波的并行结构,该结构采用移位操作、乒乓缓存、基于行的列变换等多种方法,大大减少了硬件资源的开销,提高了DSP的利用率;它的处理速度达到了每秒85帧,满足实时要求,这一实现方案可应用于图像的实时压缩、去噪等多种场合。

参考文献:

- [1] SWELDENS W. The lifting scheme: A construction of second generation wavelets [J]. *SIAM J. Math. Anal.*, 1997, 29(2): 511-546.
- [2] CALDERBANK R C, DAUBECHIES I, SWELDENS W, et al. Wavelet transforms that map integers to integers [J]. *Applied and Computational Harmonic Analysis*, 1998, 5(3): 332-369.
- [3] 张雷. 数字 X 光医学影像压缩技术 [J]. *光学 精密工程*, 2004, 12(6): 632-637.
ZHANG L. Computed X radiography image compression [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2004, 12(6): 632-637. (in Chinese)
- [4] 解成俊. 基于提升方案与 SPIHT 算法相结合用于图像的无损压缩 [J]. *光学 精密工程*, 2002, 10(6): 564-568.
XIE CH J. Research on the application of lifting scheme in image lossless compression [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2002, 10(6): 564-568. (in Chinese)
- [5] 王沛. 基于小波变换的图像自适应盲水印算法 [J]. *光学 精密工程*, 2002, 10(3): 247-252.

- WANG P. Adaptive blind water marking algorithm based on wavelet transform[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2002, 10(3): 247-252. (in Chinese)
- [6] Document SPRU189F. TMS320C6000 CPU and instructions set reference guide [Z]. 2000.
- [7] DAUBECHIES I, SWELDENS W. Factoring wavelet transforms into lifting steps[J]. *J. Fourier Anal. Appl.*, 1998, 4: 247-269.
- [8] SWELDEN W. The lifting scheme: a new philosophy in biorthogonal wavelet construction [J]. *SPIE*, 1995, 2569: 68-79.

作者简介: 陈升来(1978 -), 男, 浙江人, 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所博士研究生, 主要研究方向为数字图像处理、图像压缩和小波变换技术。E-mail: chensl_01@yahoo.com.cn